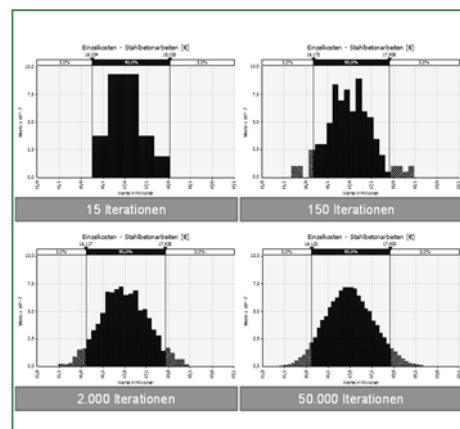
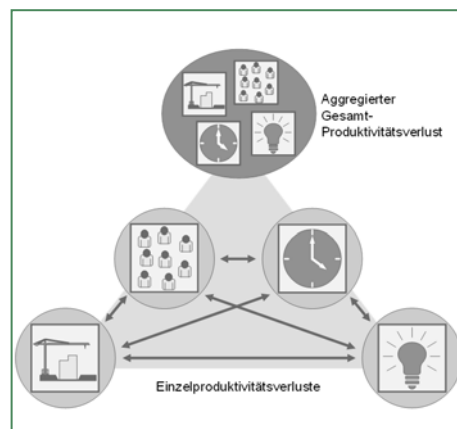
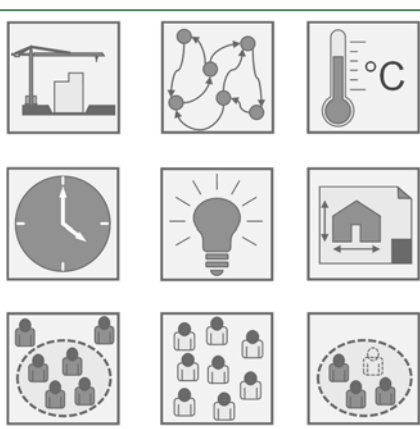


# DISSERTATION



## AGGREGIERTE BERÜCKSICHTIGUNG VON PRODUKTIVITÄTSVERLUSTEN BEI DER ERMITTLUNG VON BAUKOSTEN UND BAUZEITEN DETERMINISTISCHE UND PROBABILISTISCHE BETRACHTUNGEN

Dipl.-Ing. Markus Kummer, BSc

Vorgelegt am  
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft

Betreuer  
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler

Zweitbetreuer  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko

Graz, 12. November 2015





Dipl.-Ing. Markus Kummer, BSc

**Aggregierte Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten bei der  
Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten –  
Deterministische und probabilistische Betrachtungen**

**DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler

Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft

Zweitbetreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

---

Datum

---

Unterschrift



# Kurzfassung

Die Anwendung linearer deterministischer Berechnungsmodelle zur Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten stellt den Status quo in der baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Praxis dar und wird zum Anlass genommen, das Zusammenwirken bzw. die Abhängigkeit zwischen vorgegebener Bauzeit und Baukosten näher zu beleuchten. Neben der Linearisierung wird auch die fehlende systematische Berücksichtigung von Unsicherheiten kritisch hinterfragt. Das Ziel von Berechnungen für zukünftige Ereignisse stellen Aussagen über mögliche Bandbreiten und Eintrittswahrscheinlichkeiten auf Basis des aktuellen Informationsstands dar. Durch die Wahl von deterministischen Werten innerhalb dieser ermittelten Bandbreiten kann darauf basierend ein Chancen-Risiko-Verhältnis angegeben werden.

Für die vorliegende Arbeit werden „Chance“ und „Risiko“ als gleichwertige Begriffe aufgefasst, bei denen die Auswirkungen und auch deren Eintrittswahrscheinlichkeiten (subjektiv oder objektiv) bekannt sind.

Im Zentrum der Betrachtungen steht die wesentliche Kennzahl „Produktivität“, die direkt mit Aufwands- und Leistungswerten in Zusammenhang steht. Produktivitätsverluste wirken sich demnach unmittelbar auf den Aufwandswert aus und sind in nichtlinearen Berechnungen zu berücksichtigen. Aufbauend auf die Untersuchungen von Hofstadler werden Methoden gezeigt, wie Produktivitätsverluste in der Kalkulation berücksichtigt werden können. Gleichzeitig wird ein Fokus darauf gelegt, die möglichen gegenseitigen Wechselwirkungen zu erfassen. Es wird neben einer reinen Addition besonders auf die Aggregation von Produktivitätsverlusten eingegangen.

Die systematische Berücksichtigung unsicherer Eingangsparameter erfolgt durch den Einsatz von Monte-Carlo-Simulationen, deren Ergebnisse mittels statistischer Kenngrößen analysiert werden können. Die Wahl der Verteilungsfunktionen sowie der Korrelationen zwischen den Eingangsparametern werden hinsichtlich ihrer Einflüsse auf die Form und Streuung der Simulationsergebnisse anhand von einfachen Beispielen untersucht und Angaben aus der Literatur miteinander verglichen.

Weiters wurde eine ExpertInnenbefragung zum Thema „Unsicherheiten und Produktivitätsverluste bei Stahlbetonarbeiten (Ortbeton) und Mauerarbeiten“ durchgeführt, um Primärdaten zu erheben und aktuelles Fachwissen zu sichern. Die Analyse dieser Umfrage erfolgt auf Basis von deskriptiven statistischen Kennzahlen sowie graphischer Verfahren (Violinplots, Diagramme).

Im Zuge der Modellbildung werden zunächst die Wirkungszusammenhänge zwischen den Berechnungsparametern bzw. zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit dargestellt. Auftretende Rückkoppelungen erfordern dabei für die Aggregation von Produktivitätsverlusten iterative Berechnungen. Die Produktivitätsverluste werden über nichtlineare Zusammenhänge in das Berechnungsmodell integriert und die Unsicherheiten der Inputparameter durch Verteilungsfunktionen berücksichtigt.

Anhand eines Berechnungsbeispiels wird der Unterschied zwischen der Addition und der Aggregation von Produktivitätsverlusten und der Einsatz der Monte-Carlo-Simulation zur Berücksichtigung von Unsicherheiten gezeigt.

# Abstract

The application of linear, deterministic computation models to determine construction costs and times is considered to be the status quo in construction management and economics. This situation provides the starting point to more thoroughly analyze the interactions and dependencies between the specified construction time and construction cost. This paper critically reviews not only the concept of linearization but also the systematic consideration of uncertainties. Simulations of future events should enable conclusions regarding possible ranges and probabilities of occurrence in reliance on currently available information. On this basis, a risk/chance ratio can be stated by selecting deterministic values within these calculated ranges.

For the purpose of this paper, „chance“ and „risk“ are considered to be equally valid concepts whose consequences and (subjective or objective) probabilities of occurrence are known.

This paper concentrates on the key performance indicator of productivity, which is directly related to labor consumption and output rates. Thus, losses of productivity have a direct influence on labor consumption rates and must be considered in non-linear calculations. Starting from the research conducted by Hofstadler, methods are demonstrated to include losses of productivity in the costing exercise. Another key aim of this paper is to capture potential interactions. It considers pure addition but also aggregation of productivity losses.

The systematic consideration of uncertain input parameters is ensured by Monte-Carlo simulations whose results can be analyzed using statistical variables. Simple examples and references to pertinent literature are given to study and analyze selected distribution functions and correlations between input parameters with respect to their influence on the type and spread of simulation results.

Furthermore, an expert survey was conducted on „Uncertainties and Losses of Productivity in Reinforced Concrete Works (Cast-in-Place Concrete) and Masonry Works“ to gather primary data and capture current expert knowledge. This survey is analyzed based on descriptive statistical indicators and methods of graphical representation (violin plots, diagrams).

The modeling exercise initially concentrates on identifying the interactions and dependencies between calculation parameters and between construction costs and the specified construction time. Feedback phenomena require iterative calculations to aggregate losses of productivity. Productivity losses are integrated into the computation model via non-linear correlations, input parameter uncertainties are considered by using appropriate distribution functions.

This paper includes a worked example to demonstrate the difference between addition and aggregation of losses of productivity as well as the application of the Monte-Carlo simulation method to consider uncertainties.



# Danksagung

Diese Arbeit entstand im Zuge meiner Tätigkeit als Projektassistent am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Graz zwischen 2012 und 2015. Ich bedanke mich an dieser Stelle bei meinen Kolleginnen und Kollegen für die nette Aufnahme am Institut und die gute Zusammenarbeit.

Ein herzliches Dankeschön für die ausgezeichnete und sehr intensive Betreuung und das große persönliche Interesse an dieser Dissertation richte ich an Herrn Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler. Im Zuge der sehr kollegialen Zusammenarbeit bei zahlreichen Projekten konnte ich auch abseits der Doktorarbeit sehr viele wertvolle Erfahrungen für die Zukunft sammeln. Das „5F-Prinzip“ (Forschen, Fordern, Fördern, Flow und Freude) hat sehr gut funktioniert und in der angestrebten Zeit zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit geführt.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko danke ich für die Übernahme der Zweitbegutachtung, die wertvollen Inputs und die Möglichkeit, den Fortschritt der Arbeit mehrfach vor dem Fachkollegium in Darmstadt präsentiert haben zu dürfen.

Einen wesentlichen Beitrag leisteten die befragten ExpertInnen aus Österreich und Deutschland, die mit ihrem entgegen gebrachten Vertrauen sowie ihrer Mühe und der wertvollen Zeit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Die im Anschluss an die schriftliche Befragung persönlich geführten Gespräche zu den Themen der Unsicherheiten und Produktivitätsverluste, waren sehr aufschlussreich und interessant. Danke!

Herrn Thomas Klebel, Bsc. danke ich für die Unterstützung bei der Auswertung der ExpertInnenbefragung mit dem Programm R.

Für die wertvollen Anmerkungen, Korrekturen und Diskussionen möchte ich mich bei all jenen bedanken, denen diese Arbeit bereits in der Rohfassung vorlag und die nicht mit dem „Rotstift“ gespart haben. Hervorzuheben sind hierbei Herr Ass.-Prof. i.R. Dr. Ernst Kotzmann und besonders Herr Dipl.-Ing. Alexander Kluckner, der mich vor allem in der Schlussphase mit seinem „Blick fürs Detail“ und wertschätzenden Worten unterstützt hat.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, Silvia und Klaus, die mich immer in allen Lebenslagen aufopferungsvoll unterstützt, mich in meinen Entscheidungen bestärkt und das Verfassen dieser Arbeit so überhaupt erst möglich gemacht haben.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meiner Freundin Katrin, die mich durch die vergangenen, teilweise sehr turbulenten und arbeitsreichen Jahre begleitet hat, für den liebevollen Rückhalt sowie die zeitliche und räumliche Flexibilität bedanken.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>II</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung und Hintergründe der Arbeit .....	1
1.2 Wissenschaftliche Einordnung .....	5
1.3 Forschungsmethodik .....	7
1.4 Abgrenzung und Einordnung der Arbeit .....	10
1.5 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit .....	11
<b>2 Risikoverständnis.....</b>	<b>15</b>
2.1 Einführung.....	15
2.2 Herkunft .....	17
2.3 Verwendung und Auffassung des Risikobegriffs.....	18
2.3.1 Allgemeiner Sprachgebrauch.....	18
2.3.2 Verwendung in der Wirtschaft.....	21
2.3.3 Verwendung in der Bauwirtschaft .....	26
2.3.4 Normung .....	31
2.4 Verwendung des Risikobegriffs in dieser Arbeit.....	32
2.5 Bezugsbasis.....	34
2.6 Einordnung verwandter Begriffe .....	36
2.7 Zusammenfassung .....	37
<b>3 Kennzahlen .....</b>	<b>39</b>
3.1 Allgemeines zu Kennzahlen.....	39
3.1.1 Kennzahlenarten.....	39
3.1.2 Beziehungen zwischen Kennzahlen .....	40
3.1.3 Verwendung von Kennzahlen .....	41
3.1.4 Erhebung von Kennzahlen .....	42
3.2 Produktivität .....	42
3.2.1 Produktivitätsverluste.....	45
3.2.2 Modellierung von Produktivitätsverlusten .....	46
3.3 Aufwandswerte .....	49
3.3.1 REFA-Methodenlehre .....	50
3.3.2 Ablaufarten des Menschen .....	52

3.3.3	Definition der Zeitarten.....	53
3.3.4	Ablaufarten als Bestandteile von Aufwandswerten.....	56
3.3.5	Zusammenhang zwischen Zeitanteilen und Produktivitätsverlusten.....	56
3.3.6	Differenzierung von Aufwandswerten .....	59
3.4	Leistung .....	61
3.5	Zusammenhang zwischen Aufwandswert, Arbeitsproduktivität und Leistung .....	62
<b>4</b>	<b>Unsicherheiten und Nichtlinearitäten im Baubetrieb und in der Bauwirtschaft.....</b>	<b>65</b>
4.1	Baukosten- und Bauzeitermittlung unter Unsicherheit .....	65
4.1.1	Aussagen über die Zukunft.....	65
4.1.2	Genauigkeit der Vorhersagen .....	67
4.1.3	Vorhersagen von Baukosten und Bauzeit durch AG und AN ..	70
4.2	Prozessbasierte Ausführung .....	76
4.3	Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit.....	77
4.4	Bauzeit.....	88
4.5	Gründe für eine nicht normale Bauzeit.....	90
4.6	Kostenverläufe.....	91
4.7	Einfluss von Nichtlinearitäten .....	92
4.8	Verschiedene Zusammenhänge zwischen Variablen.....	93
4.9	Produktivitätsverluste im Baubetrieb .....	98
4.9.1	Verminderte Krankkapazität .....	98
4.9.2	Tagestemperatur.....	99
4.9.3	Erhöhte tägliche Arbeitszeit .....	100
4.9.4	Veränderte Lichtverhältnisse .....	101
4.9.5	Über- oder Unterschreitung der Arbeitsgruppengröße .....	102
4.9.6	Mindestarbeitsfläche .....	104
4.10	Gleichzeitig auftretende Produktivitätsverluste.....	105
4.10.1	Addition von Produktivitätsverlusten .....	106
4.10.2	Aggregation von Produktivitätsverlusten.....	106
4.11	Zusammenfassung .....	110
<b>5</b>	<b>Grundlagen zur Anwendung der Monte-Carlo-Simulation .....</b>	<b>111</b>
5.1	Historische Entwicklung.....	111
5.2	Methodik .....	112
5.3	Einordnung der Methode .....	113
5.3.1	Spieltheorie .....	114
5.3.2	Determinismus .....	114
5.3.3	Stochastik .....	115
5.3.4	Wahrscheinlichkeitsrechnung .....	116
5.3.5	Statistik .....	116

5.3.6	Probabilistik/Probabilismus .....	117
5.3.7	Operations Research .....	118
5.3.8	Numerik.....	118
5.4	Software .....	119
5.5	Begriffe.....	120
5.5.1	Zufallsvariable.....	120
5.5.2	Verteilung.....	120
5.5.3	Histogramm.....	125
5.5.4	Lageparameter .....	125
5.5.5	M-Schätzer nach Huber .....	127
5.5.6	Zentraler Grenzwertsatz .....	128
5.5.7	Gauß'sches Fehlerfortpflanzungsgesetz .....	128
5.5.8	Korrelation/Korrelationskoeffizienten .....	131
5.5.9	Simulation .....	134
5.5.10	Iteration .....	136
5.5.11	Sicherheitsniveau.....	137
5.6	Funktion der Monte-Carlo-Simulation .....	137
5.6.1	Generierung von Zufallszahlen.....	140
5.6.2	Probenerhebungsverfahren .....	141
5.6.3	Anzahl der Iterationen.....	142
5.7	Einfluss der Form von Verteilungsfunktionen.....	143
5.8	Einfluss der Schiefe von Verteilungsfunktionen.....	146
5.8.1	Addition.....	147
5.8.2	Subtraktion.....	147
5.8.3	Multiplikation .....	148
5.8.4	Division .....	149
5.8.5	Zusammenfassung zum Einfluss der Schiefe.....	149
5.9	Verteilungsfunktionen in der Bauwirtschaft.....	149
5.9.1	Hruschka.....	150
5.9.2	Schubert .....	150
5.9.3	Golenko .....	151
5.9.4	Dinort .....	151
5.9.5	Schulz .....	152
5.9.6	Lederer .....	153
5.9.7	Strehl .....	153
5.9.8	Liberda.....	154
5.9.9	Iwan .....	154
5.9.10	Chau .....	154
5.9.11	Raftery .....	159
5.9.12	Link .....	160
5.9.13	Werner .....	161
5.9.14	Raaber .....	161
5.9.15	Rohr .....	161
5.9.16	Schach.....	162
5.9.17	Feik.....	162

5.9.18	Girmscheid/Motzko .....	163
5.9.19	Girmscheid/Busch.....	163
5.9.20	Demmler .....	163
5.9.21	Hauwermeiren/Vose .....	163
5.9.22	Gleißner .....	164
5.9.23	Sander .....	164
5.9.24	Mayer.....	165
5.9.25	Hofstadler.....	165
5.9.26	Schach/Flemming .....	166
5.9.27	Zusammenfassung der Literaturansätze für Verteilungsfunktionen .....	166
5.10	Wahl von Verteilungsfunktionen .....	169
5.10.1	Theoretische Überlegungen und Charakteristika.....	171
5.10.2	Datenerhebung aus der Praxis .....	172
5.10.3	ExpertInnenbefragungen (ex ante) .....	176
5.10.4	Kombination der Erhebungsmethoden .....	177
5.11	Einfluss von Korrelationen .....	178
5.11.1	Addition .....	178
5.11.2	Subtraktion.....	180
5.11.3	Multiplikation .....	181
5.11.4	Division .....	182
5.11.5	Zusammenfassung – Einfluss von Korrelationen auf zwei Variablen.....	183
5.11.6	Einfluss von Korrelationen auf die Summe mehrerer Variablen – Praktische Anwendung mit @Risk.....	183
5.12	Korrelationen in der Bauwirtschaft.....	188
5.12.1	Hruschka.....	188
5.12.2	Golenko.....	189
5.12.3	Dinort .....	189
5.12.4	Schulz .....	189
5.12.5	Lederer.....	190
5.12.6	Liberda.....	191
5.12.7	Touran/Wiser .....	192
5.12.8	Chau .....	192
5.12.9	Raftery .....	193
5.12.10	Link .....	194
5.12.11	Yang.....	194
5.12.12	Rohr .....	195
5.12.13	Feik .....	196
5.12.14	Girmscheid/Busch.....	196
5.12.15	Gleißner .....	196
5.12.16	Sander .....	197
5.12.17	Krempf.....	197
5.12.18	Mayer.....	198
5.12.19	Schach/Flemming .....	198

5.12.20	Zusammenfassung der Literaturansätze für Korrelationen.....	198
5.13	Zusammenfassung .....	201
5.13.1	Kritik an deterministischen Berechnungen.....	201
5.13.2	Interpretation von Simulationsergebnissen.....	203
5.13.3	Vorteile von Monte-Carlo-Simulationen .....	205
5.13.4	Nachteile von Monte-Carlo-Simulationen .....	206
<b>6</b>	<b>Empirische Datenerhebung.....</b>	<b>209</b>
6.1	Ziel der ExpertInnenbefragung .....	209
6.2	Auswahl der ExpertInnen.....	210
6.3	Fragebogengestaltung .....	213
6.4	Durchführung der Befragung .....	214
6.5	Beschreibung der Auswertungsverfahren.....	214
6.5.1	Deskriptive Auswertung .....	214
6.5.2	Grafische Auswertung.....	217
6.6	Darstellung der Ergebnisse der ExpertInnenbefragung.....	220
6.6.1	Kombination von Produktionsfaktoren .....	220
6.6.2	Anzahl an Produktivitätsverlusten.....	228
6.6.3	Produktivitätsverluste je Projektphase.....	230
6.6.4	Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit .....	233
6.6.5	Korrelationen zwischen Parametern zur Berechnung des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten .....	243
6.7	Zusammenfassung .....	252
<b>7</b>	<b>Modellbildung.....</b>	<b>255</b>
7.1	Grundlagen zur Modellierung.....	255
7.2	Umgang mit Informationen.....	258
7.3	Qualitativer Wirkungszusammenhang .....	260
7.3.1	Grobbetrachtung.....	261
7.3.2	Detailbetrachtung.....	262
7.4	Betrachtungszustände .....	264
7.5	Quantitativer Wirkungszusammenhang .....	265
7.5.1	Ermittlung der erforderlichen Leistung.....	265
7.5.2	Erhöhung des Grund-Aufwandswerts infolge von Produktivitätsverlusten.....	267
7.5.3	Zusammensetzung der Aufwandswerterhöhungen .....	267
7.5.4	Abhängigkeiten der Aufwandswerterhöhungen vom Ressourceneinsatz und den Randbedingungen.....	268
7.5.5	Abhängigkeiten des Ressourceneinsatzes.....	268
7.6	Anforderungsprofil, Zielbeschreibung und Abgrenzung.....	269
7.6.1	Lastenheft .....	269
7.6.2	Pflichtenheft .....	272
7.7	Optimierungen mittels Simulation .....	273
7.7.1	Grundlagen zur Optimierung.....	274

7.7.2	Regelkreis der Optimierung .....	275
7.7.3	Einflüsse auf die Qualität der Optimierung .....	278
7.8	Zusammenfassung .....	279
<b>8</b>	<b>Anwendungsbeispiel.....</b>	<b>281</b>
8.1	Beschreibung der Ausgangssituation (Angabe) .....	281
8.2	Ermittlung der normalen Bauzeit .....	282
8.3	Grenzgrößen der Produktivitätsverluste .....	284
8.3.1	Verringerte Krankapazität .....	284
8.3.2	Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche .....	284
8.3.3	Erhöhte tägliche Arbeitszeit .....	285
8.3.4	Veränderte Lichtverhältnisse .....	286
8.3.5	Veränderte Arbeitsgruppengröße .....	286
8.3.6	Nicht optimale Tagestemperatur .....	287
8.4	Ablauf der Berechnung – Modell .....	288
8.5	Erläuterung der Berechnung – deterministische Addition ..	289
8.5.1	Verringerte Krankapazität .....	291
8.5.2	Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche .....	292
8.5.3	Erhöhte tägliche Arbeitszeit .....	292
8.5.4	Veränderte Arbeitsgruppengröße .....	293
8.5.5	Veränderte Lichtverhältnisse .....	295
8.5.6	Nicht optimale Tagestemperatur .....	295
8.6	Erläuterung der Berechnung – deterministische Aggregation .....	296
8.7	Probabilistische Addition .....	302
8.7.1	Eingabewerte .....	302
8.7.2	Ergebnisse und Interpretation .....	303
8.8	Probabilistische Aggregation .....	304
8.8.1	Eingabewerte .....	304
8.8.2	Ergebnisse und Interpretation .....	305
8.9	Aufwandswerterhöhungen unterschiedlicher Produktivitätsverlustprofile .....	306
8.9.1	Kombination 1 – AD .....	306
8.9.2	Kombination 2 – CD .....	308
8.9.3	Kombination 3 – ACD .....	310
8.9.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse .....	311
8.10	Zusammenfassung .....	316
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>319</b>
9.1	Kommentare zu den Thesen der Arbeit.....	322
9.2	Beantwortung der Forschungsfragen .....	323
9.3	Nutzen der Arbeit.....	325
9.4	Ausblick und Forschungsbedarf .....	327



<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>329</b>
10.1	Bücher/Buchkapitel .....	329
10.2	Masterarbeiten/Diplomarbeiten und Dissertationen .....	335
10.3	Zeitschriften- und Fachartikel .....	337
10.4	Tagungs- und Kongressschriften .....	340
10.5	Vorträge, Präsentationen, Workshop- und Vorlesungsunterlagen .....	341
10.6	Regelwerke, Normen, Leitfäden .....	342
10.7	Anwenderinformationen .....	343
10.8	Internetquellen .....	343
10.9	Literaturquellen für die Auswertungen in R .....	346
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>349</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>357</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>367</b>



## 1 Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Umgang sowie der Quantifizierung und der Aggregation von Produktivitätsverlusten und der Berücksichtigung von Unsicherheiten. Speziell werden nichtlineare Zusammenhänge unter Verwendung probabilistischer Berechnungsverfahren behandelt. Zum Einsatz kommen dabei Monte-Carlo-Simulationen.

In diesem Kapitel erfolgt eine Einführung zur vorliegenden Arbeit, es wird auf die wissenschaftliche Einordnung der Baubetriebs- und Bauwirtschaftswissenschaften sowie auf die angewendete Forschungsmethodik näher eingegangen und eine Abgrenzung der Arbeit durchgeführt. Das Kapitel schließt mit einer Darstellung der Strukturierung der vorliegenden Dissertation.

### 1.1 Einführung und Hintergründe der Arbeit

Die angespannte Wirtschaftslage, ein generell niedriges Preisniveau, wenige Bauvorhaben und der Druck der Konkurrenz zwingen Baufirmen in der heutigen Baupraxis Aufträge eher mit niedrigen als mit „auskömmlichen“ Preisen zu akquirieren. Die Bieter bzw. späteren Auftragnehmer (AN) sind den Risiken daher meist näher als den Chancen.

Durch zu kurz angesetzte Bauzeiten der Auftraggeber (AG) und dem damit vorherrschenden Termindruck bleibt für die Arbeitsvorbereitung wenig Zeit und die Angebotskalkulation kann oft nicht mit dem nötigen Hintergrundwissen durchgeführt werden. Außerdem ist zu beachten, dass nicht jedes Angebot zu einem Auftrag führt. Mit den Ressourcen der Angebotskalkulation ist umsichtig umzugehen, da die entstehenden Kosten von mehreren bearbeiteten Ausschreibungen auf wenige ausgeführte Projekte umgelegt werden müssen.

Die angebotenen Preise eines Angebots sind im weitesten Sinne bindend, außer es treten z.B. während der Ausführung unbekannte, hinderliche Umstände der Leistungserbringung auf oder es kommt zu massiven Mengenänderungen bzw. Leistungsänderungen. Solche Abweichungen vom ursprünglichen Angebot sind meist mit Auseinandersetzungen mit dem AG verbunden und landen nicht selten vor Gericht.

Aktuelle Beispiele von ausgeführten oder zum Zeitpunkt, zu dem diese Arbeit verfasst wurde, noch in Bau befindlichen Projekten erwecken den Anschein, dass Kostenüberschreitungen bei Großbauprojekten eher die Regel als die Ausnahme darstellen.

Eine Untersuchung von 258 Großbauprojekten aus 20 Industrie- und Entwicklungsländern zeigt, dass der Großteil der betrachteten Projekte die ursprünglich ermittelten Baukosten um bis zu über 200 % überstiegen haben (siehe Abb. 1-1). Nur bei sehr wenigen Projekten konnte eine Kostenunterschreitung um über 40 % festgestellt werden.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vgl. Flyvbjerg/Bruzellius/Rothengatter (2005). Megaprojects and Risk – An Anatomy of Ambition. S. 14ff

Obwohl diese Betrachtung für Großprojekte durchgeführt wurde und die Randbedingungen und Vergleichsmaßstäbe nicht bekannt sind, ist umgelegt auf kleinere Bauvorhaben, ebenfalls eine deutliche Tendenz hin zu Kostenüberschreitungen feststellbar. Es wird in der Literatur ein Bereich von 5 % bis 30 % angegeben.<sup>2</sup>

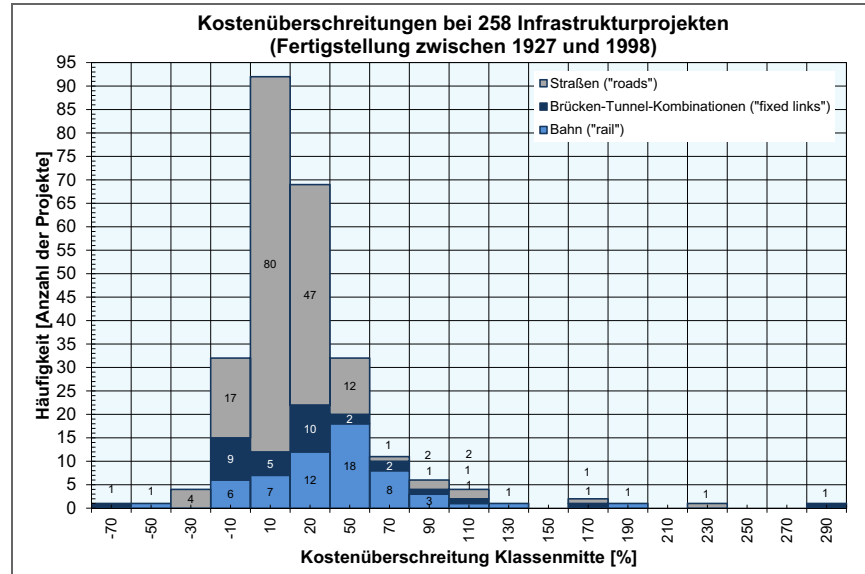


Abb. 1-1 Kostenabweichungen für 258 Großbauprojekte<sup>3</sup>

Obwohl die Ursachen der Kostenüberschreitungen sehr unterschiedlich waren/sind, führt das Scheitern von Großbauprojekten langsam zu einem Umdenken bei den öffentlichen Bauherren, die sich aus politischen Gründen Kostensteigerungen und Terminverzögerungen nicht leisten können. Da erhöhte Kosten für einen General- oder Totalunternehmer während der Projektentwicklung oft nicht politisch argumentiert werden können, versuchen die Bauherren die Schnittstellen zwischen den vielen AN und der Planung selbst zu koordinieren. Dies mündet nicht selten im Chaos und es entstehen noch höhere Kosten und Verzögerungen.<sup>4</sup>

Rothgatter plädiert dafür, auch Private, also die ausführenden Unternehmen, in die Risikoteilung miteinzubeziehen. Durch die Mittragung von Risiken sind die Baufirmen angehalten sorgfältigere Kalkulationen durchzuführen und schnell und kostengünstig zu bauen.<sup>5</sup> Erfolgreich durchgeführte BOT-<sup>6</sup> und PPP-Projekte<sup>7</sup> zeigen wie es gehen könnte.

Die Gründe für Kostenüberschreitungen sind im Wesentlichen darin zu finden, dass es sich bei Bauwerken immer um Unikate handelt. Es treffen bei unterschiedlichen Projekten wechselnde Projektpartner (Bauherr, Planer,

<sup>2</sup> Vgl. Fleming/Netzker/Schöttle (2011). Probabilistische Berücksichtigung von Kosten- und Mengenrisiken in der Angebotskalkulation. S. 94

<sup>3</sup> Darstellung vgl. Fleming/Netzker/Schöttle (2011). Probabilistische Berücksichtigung von Kosten- und Mengenrisiken in der Angebotskalkulation. S. 94

Daten aus: Flyvbjerg/Bruzelius/Rothengatter (2005). Megaprojects and Risk – An Anatomy of Ambition. S. 17

<sup>4</sup> Vgl. Gaulhofer (2013). Wenn Politiker zur Schaufel greifen. (Online unter: [http://diepresse.com/home/wirtschaft/international/1332085/Grossprojekte\\_Wenn-Politiker-zur-Schau-fel-greifen](http://diepresse.com/home/wirtschaft/international/1332085/Grossprojekte_Wenn-Politiker-zur-Schau-fel-greifen). Datum des Zugriffs: 13.01.2013)

<sup>5</sup> Vgl. Gaulhofer (2013). Die öffentliche Hand ist nicht lernfähig. (Online unter: <http://diepresse.com/home/wirtschaft/international/1332088/Die-offentliche-Hand-ist-nicht-lernfaehig>. Datum des Zugriffs: 13.01.2013)

<sup>6</sup> BOT = Build Operate Transfer

<sup>7</sup> PPP = Public Private Partnership

Ausführende etc.) aufeinander, die unter sich ändernden Bedingungen (Baustellen-, Bauverfahrens-, Bauwerks-, Betriebsbedingungen) einen „Prototyp“ bauen. Die eigentliche Produktion geschieht hauptsächlich auf der Baustelle, die eine nicht stationäre Produktionsstätte darstellt und sich über die Dauer des Baufortschritts ständig ändert.<sup>8</sup> Die örtlichen Gegebenheiten jeder Baustelle haben wesentlichen Einfluss auf die Produktivität der Bauausführung. Dies beginnt bei der Festlegung von Lagerflächen und Anlieferungs-zonen und reicht bis hin zu Einschränkungen in Bezug auf mögliche Kranstandorte. Weiters handelt es sich bei der Bauindustrie um eine Bereit-schaftsindustrie. Dies bedeutet, dass nicht auf Lager produziert (geringe Terminelastizität) und der Bedarf nur marginal beeinflusst werden kann. Es wird eine ständige Marktbereitschaft gefordert, die durch saisonale und witterungsbedingte Umstände erschwert wird und sich negativ auf Finanzierungen und Investitionen auswirkt. Die Bauindustrie ist in hohem Maße von konjunkturellen Entwicklungen und dem antizyklischen Verhalten öffentlicher AG abhängig.

Kostenüberschreitungen sind meist sehr vielschichtig begründet und können sowohl in der Sphäre des AG (z.B. Planungsänderungen, Baugrundverhältnisse, Finanzierungsprobleme, Planungsfehler, Ausschreibungsfehler, Organisationsdefizite, Koordinationsfehler) als auch in der Sphäre des AN (z.B. Ausführungsmängel, Kapazitätsengpässe, Fehler in der Kalkulation und Arbeitsvorbereitung, Wahl des falschen Bauverfahrens, Konkurs von Subunternehmern, Forcierungsmaßnahmen um den Fertigstellungstermin zu halten) liegen.

Öffentliche AG reagieren mittlerweile auf den Trend der Kostenüberschreitungen bei Bauprojekten. In Großbritannien teilen sich bei Kostenüberschreitungen die Regierung und die Konstrukteure die Zusatzkosten zu gleichen Teilen auf. Wird ein vorher festgelegter Puffer überschritten, übernimmt die Baufirma sämtliche Mehrkosten.<sup>9</sup> Mit diesem Vorgehen werden zwar die Ziele von AN und AG „synchronisiert“, es entstehen jedoch ungleich höhere Risiken für den AN. Bei einer solchen vertraglichen Gestaltung das „Billigstbieterprinzip“ anzuwenden ist zumindest kritisch zu hinterfragen. Es ist ein Angebot anzustreben, das auf realisierbaren Preisen beruht. Eine Abschätzung der Kosten und Bauzeit kann hier den Beteiligten aufzeigen, welches Chancen- und Risikopotential in dem eingereichten Angebot liegt.

Wesentliche Fragen sowohl für den AN als auch für den AG sind z.B.:

- Kann das Projekt zu den vorgegebenen Kosten realisiert werden?
- Ist aufgrund des niedrigen Preises mit Qualitätsminderungen zu rechnen?
- Ist vermehrt mit Nachträgen zu rechnen?
- Mit welcher Wahrscheinlichkeit kann die vorgegebene Bauzeit eingehalten werden?
- Welche Auswirkungen haben geänderte Mengen auf die Bieterreihenfolge?
- Sind die angebotenen (Einheits-)Preise angemessen und plausibel?

<sup>8</sup> Ausnahmen stellen vorgefertigte Bauteile dar, die in einer Halle vorproduziert werden können (z.B. Holzbau, Betonfertigteiltbau, Stahlbau). Die eigentliche Montage erfolgt aber trotzdem auf einer nicht stationären Produktionsstätte – der Baustelle.

<sup>9</sup> Vgl. Flyvbjerg/Budzier (2013). Berliner, so baut ihr richtig! In: Zeit Online. (Online unter: <http://www.zeit.de/wirtschaft/2013-01/flughafen-berlin-debakel-grossbauprojekte-planungsforscher>. Zugriff am 21.04.2013)

- Mit welchen Änderungen muss der Bieter und spätere AN rechnen? (z.B. Mengenänderungen)
- Welche Annahmen trifft der Bieter und welches Risiko geht er damit ein?

In jedem Fall empfiehlt es sich sowohl für den AN als auch für den AG seine Berechnungen nicht nur deterministisch durchzuführen, sondern auch probabilistische Berechnungsverfahren miteinzubeziehen.

Um mit den Kalkulationen der Bieter näher an die Kostenwahrheit heran zu kommen ist es erforderlich, nicht nur eine – vermeintlich exakte – Zahl zu berechnen, sondern Unsicherheiten und Bandbreiten in die Berechnungen zu integrieren.<sup>10</sup> Weiters werden in den derzeit verwendeten Berechnungsmodellen meist lineare Ansätze für – in Wirklichkeit – nichtlineare Zusammenhänge verwendet. Diese Kombination aus deterministischer Berechnung und Verwendung von linearen Ansätzen führt oft zu deutlich unzutreffenden Berechnungsergebnissen, in weiterer Folge zu Fehlentscheidungen und schließlich zu erhöhten Kosten und/oder Bauzeitüberschreitungen.

Als **Forschungslücke** wurde die fehlende Berücksichtigung von Nichtlinearitäten in der Kalkulation und Bauzeitermittlung unter Verwendung probabilistischer Berechnungsverfahren identifiziert.

Es werden folgende Forschungsfragen gestellt:

- **Wie werden die Begriffe „Risiko“ und „Chance“ im Baubetrieb und der Bauwirtschaft aufgefasst und in der Praxis verwendet?**
- **Ist ein Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit vorhanden?**
- **Sind deterministische Betrachtungen dazu geeignet, genaue Berechnungen der Baukosten und Bauzeiten für die Zukunft – die auf unsicheren Parametern beruhen – durchzuführen?**
- **Wie erfolgt die Wahl von Verteilungsfunktionen und der Einsatz von Korrelationen bei Monte-Carlo-Simulationen im Bereich des Baubetriebs und der Bauwirtschaft?**
- **Wie können Nichtlinearitäten und Unsicherheiten in die Kalkulation und Bauzeitermittlung mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation systematisch integriert werden?**

Der Umgang mit Unsicherheiten wird meist unter dem Titel „Risikomanagement“ geführt, wobei bei eingehender Literaturrecherche schnell deutlich wird, dass unter Risikomanagement sehr unterschiedliche Maßnahmen und Handlungsempfehlungen in unterschiedlichen Projektphasen und unterschiedlichen Detaillierungsgraden verstanden werden. Viele dieser Literaturangaben beziehen sich auf das Projektmanagement und die Projektentwicklung, liefern jedoch keine praktischen Empfehlungen für einen Umgang mit Unsicherheiten in der Kalkulation, Arbeitsvorbereitung und Bauausführung. Auch die entsprechende Normung gibt hier nur

<sup>10</sup> Vgl. Sander/Spiegl/Schneider (2010). Die exakte Zahl. In: Die Wirtschaftliche Seite des Bauens – Festschrift zum 60. Geburtstag von Rainer Wanninger – IBB TU Braunschweig, März 2010. S. 605ff

allgemein gültige Handlungsvorgaben an und geht nur in geringem Umfang auf probabilistische Berechnungen ein.<sup>11</sup>

In dieser Arbeit wird ein Berechnungsmodell entwickelt, das sowohl für AN als auch für AG anwendbar ist und bei der Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten zum einen Nichtlinearitäten aus Produktivitätsverlusten und zum anderen Unsicherheiten der Eingangsgrößen berücksichtigt. Auf die Ergebnisinterpretation und den möglichen Nutzen probabilistischer Berechnungen (Monte-Carlo-Simulationen) für den AG und den AN wird besonders eingegangen.

Dieser wissenschaftlichen und praktischen Problemstellung wird mittels einer hermeneutischen<sup>12</sup> Verständniserweiterung begegnet, wobei Elemente des „Systems Engineering“<sup>13</sup> zur Anwendung gelangen.

Es wurden neben der Analyse vorhandener Literatur auch eigene Befragungen zum Thema des Risikomanagements in Unternehmen<sup>14</sup> sowie zum Thema der Unsicherheiten und Produktivitätsverluste bei Stahlbeton-(Ortbeton-) und Mauerarbeiten durchgeführt.

Der vorliegenden Arbeit wurden folgende Thesen<sup>15</sup> zugrunde gelegt:

- AG und AN wissen oft nicht, welche Risiken und Chancen sie mit ihren Ansätzen eingehen.
- Die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten bei der Berechnung von Baukosten ist systematisch möglich.
- Durch die Einbeziehung von Bandbreiten und die Berücksichtigung von Unsicherheiten werden die Voraussetzungen zur Ermittlung der „Kostenwahrheit“<sup>16</sup> gegeben.
- Der Mehraufwand in der Berechnung ist durch die Schaffung einer soliden Entscheidungsbasis gerechtfertigt.

Die aufgestellten Thesen sollen bestätigt und Ansätze für den systematischen Umgang mit Unsicherheiten und Nichtlinearitäten entwickelt werden.

## 1.2 Wissenschaftliche Einordnung

Die Baubetriebs- und Bauwirtschaftswissenschaften und deren Forschung bewegen sich in einem Spannungsfeld aus theoretischer Bearbeitung, ExpertInnenwissen (Erfahrungen) und Versuchen/Experimenten. Im Feld der Wissenschaften sind die Baubetriebs- und Bauwirtschaftswissenschaften – damit auch die vorliegende Arbeit – den Realwissenschaften und hier anwen-

<sup>11</sup> Vgl. z.B. ISO 31000; ONR 49000

<sup>12</sup> Hermeneutik ist die Lehre des Verstehens

<sup>13</sup> Bei Systems Engineering handelt es sich um eine, auf bestimmte Denkmodelle und Grundprinzipien beruhende Wegleitung zur zweckmäßigen und zielgerichteten Gestaltung komplexer Systeme (siehe dazu auch Abschnitt 1.3). Vgl. Haberfellner et al. (2002). Systems Engineering – Methodik und Praxis. S. XVIIIff

<sup>14</sup> Im Zuge einer durch den Verfasser mitbetreuten Masterarbeit an der Technischen Universität Graz: Vgl. Alber (2013). Risikomanagement in Bauunternehmen – Eine Analyse von Theorie und Praxis.

<sup>15</sup> Eine These beansprucht eine allgemeine Gültigkeit für sich, während eine Hypothese nur unter bestimmten gegebenen Bedingungen (im Sinne einer Wenn-Dann-Beziehung) gilt.

<sup>16</sup> Kostenwahrheit: „Der Begriff der Kostenwahrheit betrifft in der Bauwirtschaft die Einbeziehung aller projektrelevanten Randbedingungen in die Kostenermittlung oder Kalkulation, insbesondere die Berücksichtigung von Baukostensteigerungen bei veränderlichen Preisen, Risikotransfer sowie jene der Finanzierung (zB. Bauzinsen).“ Lechner (2011). Wörterbuch (dt./engl.) BauProjektManagement. S. 80

dungsorientiert und interdisziplinär den Ingenieur- und Sozialwissenschaften zuzuordnen (siehe Abb. 1-2).

Wissenschaften					
Formalwissenschaften		Realwissenschaften			
Axiomatische Wissenschaften	Seinswissenschaften	Naturwissenschaften	Ingenieurwissenschaften	Sozialwissenschaften	Geisteswissenschaften
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Logik</li> <li>▪ Mathematik</li> <li>▪ Informatik</li> <li>▪ Strukturwissenschaften</li> <li>▪ etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Philosophie</li> <li>▪ Wissenschaftstheorie</li> <li>▪ Theologie</li> <li>▪ Ethik</li> <li>▪ etc.</li> </ul>	<p><b>physikalisches</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Physik</li> <li>▪ Chemie</li> <li>▪ Geologie</li> <li>▪ Astronomie</li> <li>▪ etc.</li> </ul> <p><b>biologisches</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mikroorganismen</li> <li>▪ Pflanzen</li> <li>▪ Tiere</li> <li>▪ etc.</li> </ul> <p><b>humanes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Medizin</li> <li>▪ Psychologie</li> <li>▪ etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Maschinenbau</li> <li>▪ Elektrotechnik</li> <li>▪ Bauingenieurwesen</li> <li>▪ Verfahrenstechnik</li> <li>▪ Umwelttechnik</li> <li>▪ Bergbau</li> <li>▪ Softwareentwicklung</li> <li>▪ Sicherheitstechnik</li> <li>▪ Energietechnik</li> <li>▪ Haus- und Gebäudetechnik</li> <li>▪ Chemieingenieurwesen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Politologie</li> <li>▪ Recht</li> <li>▪ Soziologie</li> <li>▪ Wirtschaft</li> <li>▪ Volkswirtschaft</li> <li>▪ etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sprache</li> <li>▪ Literatur</li> <li>▪ Kunst</li> <li>▪ Geschichte</li> <li>▪ Psychologie</li> <li>▪ Religionswissenschaften</li> <li>▪ etc.</li> </ul>
Instrumente		Baubetriebs- und Bauwirtschaftswissenschaften			

Abb. 1-2 Einordnung der Baubetriebs- und Bauwirtschaftswissenschaften<sup>17</sup>

Je nach Forschungsgegenstand können auch Elemente der Naturwissenschaften in die Betrachtungen integriert werden und sich Schwerpunkte in einem bestimmten Fachbereich ergeben. Für die Umsetzung der Forschung bzw. zur Darstellung von Ergebnissen und dem Erstellen von Modellen (induktiver Denkprozess) werden Instrumente der Formalwissenschaften und hier besonders der axiomatischen Wissenschaften (z.B. Mathematik, Logik, Informatik) eingesetzt.

Der Einsatz mathematisch-naturwissenschaftlicher Methoden ist eines der Charakteristika empirisch-analytischen<sup>18</sup> Vorgehens innerhalb der Sozialwissenschaften.<sup>19</sup>

Es wird versucht, Wirklichkeitsausschnitte zu präzisieren und zu beschreiben sowie Handlungsalternativen aufzuzeigen. Darunter wird die Entwicklung phänomenologischer Erklärungsmodelle und aktionaler Entscheidungs- und Gestaltungsmodelle verstanden. Diese angewandten Wissenschaften werden auch als Handlungswissenschaften bzw. hermeneutische Realwissenschaften bezeichnet.<sup>20</sup>

<sup>17</sup> Vgl. Ulrich/Hill (1976). Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). S. 305  
Vgl. Girmscheid (2007). Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften. S. 47

<sup>18</sup> Empirisch heißt „erfahrungsmäßig“, also auf Erfahrung, Beobachtung, Befragung, Experiment usw. basierend. Analytisch heißt „in seine Bestandteile auflösend“: der zu untersuchende Gegenstand wird in seine Bestandteile zerlegt und deren Beziehungen untereinander werden theoretisch rekonstruiert, wobei die Mathematik als Hilfsmittel dient.

<sup>19</sup> Vgl. <http://paedpsych.jk.uni-linz.ac.at/INTERNET/ARBEITSBLAETTER/ERZIEHUNGSWISSENSCHAFT/ErzWissenschafftEmpirisch.html>. Datum des Zugriffs: 05.08.2015

<sup>20</sup> Vgl. Ulrich/Hill (1976). Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). S. 305  
Vgl. Girmscheid (2007). Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften. S. 48

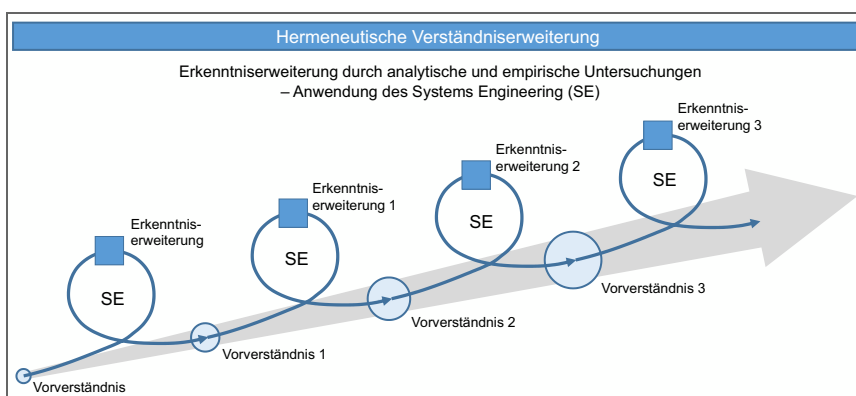


### 1.3 Forschungsmethodik

Managementprobleme und damit auch das Feld der Baubetriebs- und Bauwirtschaftswissenschaften wird der „Welt 3“<sup>21</sup> nach Popper bzw. der sozio-technischen Umwelt, die von Ingenieuren durch Prozesse und Modelle etc. (konstruktivistisch) gestaltet wird, zugeordnet.<sup>22</sup>

Baubetriebliche und bauwirtschaftliche Entscheidungen müssen in der Realität meist unter unvollkommener Information und unter zeitlichem Druck getroffen werden. Um trotzdem gute, zulässige Lösungen effektiv und effizient ermitteln zu können, werden kognitive Heuristiken<sup>23</sup> angewendet, die auf unterschiedlichen Entscheidungsregeln basieren.<sup>24</sup>

Zur Unterstützung rein heuristischer Verfahren, erfolgt im Umgang mit Unsicherheiten und Produktivitätsverlusten die Modellierung von Prozessen.<sup>25</sup> Die Berechnungen und Simulationen erfordern Eingabeparameter (Inputs), die aus dem sozio-technischen Umfeld stammen und durch Erfahrungswerte und ExpertInnenangaben teilweise subjektiv einzuschätzen sind. Durch Befragungen wird vorhandenes Wissen gesichert, der Erkenntnisstand erweitert und eine Basis für zukünftige Untersuchungen geliefert.



**Abb. 1-3** Hermeneutischer Regelkreis kombiniert mit der Anwendung von Elementen des Systems Engineering

<sup>21</sup> Popper beschreibt die „Welt 1“ als die Welt der physikalischen Materie, Kraftfelder usw.; „Welt 2“ als die Welt der bewussten und vielleicht auch unbewussten Erfahrungen; und „Welt 3“ insbesondere als die Welt der gesprochenen (geschriebenen oder gedruckten) Sprache, wie Geschichten erzählen, Mythen erfinden, Theorien, theoretische Probleme, Fehler und Argumente. Vgl. z.B. Popper (2012). Alles Leben ist Problemlösen – Über Erkenntnis, Geschichte und Politik. S. 75

<sup>22</sup> Vgl. Girmscheid (2007). Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften. S. 66ff

<sup>23</sup> Der Begriff kognitiv stammt aus der Psychologie und bezeichnet solche Funktionen des Menschen, die mit Wahrnehmung, Lernen, Erinnern und Denken, also der menschlichen Erkenntnis- und Informationsverarbeitung in Zusammenhang stehen. (Online unter: <http://www.sign-ang.uni-hamburg.de/projekte/slex/seitendvd/konzeptgl/152/15255.htm>. Datum des Zugriffs: 02.06.2015)

Der Begriff Heuristik geht zurück auf das altgriechische „heuriskein“, das „finden“ bedeutet. (Vgl. Gigerenzer/Gaissmaier (2006). Denken und Urteilen unter Unsicherheit: Kognitive Heuristiken. In: Enzyklopädie der Psychologie – Denken und Problemlösen – Kognition 8. S. 330ff – Online unter: [https://www.researchgate.net/profile/Wolfgang\\_Gaissmaier/publication/242496195\\_Denken\\_und\\_Urteilen\\_unter\\_Unsicherheit\\_Kognitive\\_Heuristiken/links/0deec528dc5b10f999000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Wolfgang_Gaissmaier/publication/242496195_Denken_und_Urteilen_unter_Unsicherheit_Kognitive_Heuristiken/links/0deec528dc5b10f999000000.pdf). Datum des Zugriffs: 20.05.2015)

<sup>24</sup> Vgl. Domschek/Scholl (2006). Heuristische Verfahren. S. 2

Vgl. Gigerenzer/Gaissmaier (2006). Denken und Urteilen unter Unsicherheit: Kognitive Heuristiken. In: Enzyklopädie der Psychologie – Denken und Problemlösen – Kognition 8. S. 330ff

<sup>25</sup> Die ÖNORM EN ISO 9000:2005 Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (S. 29) definiert einen Prozess als „Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt“

ANMERKUNG 1 Eingaben für einen Prozess sind üblicherweise Ergebnisse anderer Prozesse.

ANMERKUNG 2 Prozesse in einer Organisation (3.3.1) werden üblicherweise geplant und unter beherrschten Bedingungen durchgeführt, um Mehrwert zu schaffen. [...]“

Die Forschungsmethodik für diese Arbeit stützt sich auf einen hermeneutischen Regelkreis (siehe Abb. 1-3), bei dem ausgehend von einem Vorverständnis durch analytische und empirische Untersuchungen eine Erkenntniserweiterung (deduktive Vorgangsweise) – die die Basis für ein verändertes Vorverständnis darstellt – stattfindet.<sup>26</sup> Zusätzlich werden Elemente des Systems Engineering eingesetzt.

Im Gegensatz zu den nomothetischen<sup>27</sup>, stammen bei den hermeneutischen Wissenschaften die Probleme aus der Praxis und sind meist interdisziplinär. Die Forschungsziele sind phänomenologische Beschreibungen und Erklärungen sowie das aktionale Entwerfen und Gestalten möglicher sozialer und technischer Wirklichkeiten. Das Forschungsregulativ ist die Nützlichkeit und das Fortschrittskriterium die praktische Problemlösungskraft der Modelle und Regeln.<sup>28</sup>

Neben dem hermeneutischen Regelkreis werden in dieser Arbeit auch Elemente des Systems Engineering angewendet. Systems Engineering (SE) ist eine Methode bzw. ein Werkzeug, um komplexe Probleme und Fragestellungen behandeln zu können. Anwendungsbereiche finden sich beispielsweise in der Softwareentwicklung, der Fahrzeugtechnik, im Maschinenbau etc. SE kann aber auch im Bauwesen sowie im täglichen Leben angewendet werden.

Die Grundgedanken bzw. Prinzipien des SE (Module siehe Abb. 1-4) sind wie folgt:

- Vom Groben zum Detail – nicht umgekehrt
- Varianten bilden – nicht mit erstbesten Lösung zufriedengeben
- Zeitliche Gliederung des Projekts in Phasen
- Problemlösungszyklen anwenden

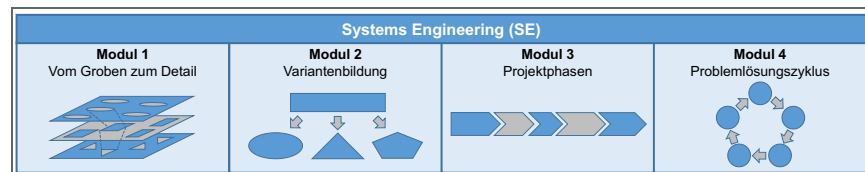


Abb. 1-4 Die vier Module des Systems Engineering<sup>29</sup>

Im Bauingenieurwesen ist die Methodik unter dem Namen „Systems Engineering“ nicht weit verbreitet.<sup>30</sup> Allerdings sind gerade Bauprojekte hervorragend dafür geeignet diese Methode anzuwenden. Bei Betrachtung der Grundgedanken des SE wird festgestellt, dass diese Prinzipien in der Baubranche durchaus gelebt werden und sich teilweise aus der Natur der Sache ergeben.

Das Vorgehen vom Groben hin zu Details ist allgemein bei der Bearbeitung von Projekten empfehlenswert. Es macht wenig Sinn, wenn beispielsweise

<sup>26</sup> Vgl. Girmscheid (2007). Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften. 2. Auflage. S. 63

<sup>27</sup> Nomothetisches Vorgehen wird den Problemen der „Welt 1“ zugeordnet. Vgl. Girmscheid (2007). Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften. S. 67

<sup>28</sup> Vgl. Ulrich (1995). Von der Betriebswirtschaftslehre zur systemorientierten Managementlehre. S. 165

<sup>29</sup> Vgl. Haberfellner et al. (2002). Systems Engineering – Methodik und Praxis. S. 29ff

<sup>30</sup> Vgl. Schütz/Hofstadler (2012). Anwendung des Systems Engineering auf die Arbeitsvorbereitung von Bauprojekten. Bautechnik 89, Heft 11. S. 802

schon Überlegungen zu einem Anschlussdetail eines Fensters gemacht werden, wenn noch kein Raumkonzept bzw. kein Entwurf des Gebäudes vorliegt. Ein solches Vorgehen hat den Vorteil, dass auch bei unerwarteter Kürzung der Bearbeitungszeit immer alle Punkte (wenn auch nur im Groben) behandelt wurden und Lösungsvorschläge bereit liegen. Es gilt das Prinzip, dass immer noch mehr in die Tiefe gegangen werden kann, ein Verrennen in bestimmte Details ist aber nicht zielführend. Im Bauwesen ist das Auflösen eines Gebäudes in seine Bestandteile, getrennt nach Herstellungsverfahren üblich und selbstverständlich. Ein Leistungsverzeichnis stellt z.B. eine schriftliche Gliederung eines Bauobjekts dar, bei dem genau der Grundsatz vom Groben (Leistungsgruppen) zum Detail (Leistungspositionen) eingehalten wird.

Das Bilden von Varianten ist beispielsweise bei der Wahl von Bauverfahren (Kletter- oder Gleitschalung, Art der Baugrubensicherung etc.) eine gängige und notwendige Methode. Unterschiedliche Ausführungsvarianten werden dann – nach vorher definierten Kriterien – miteinander verglichen, um die bestmögliche Lösung aus den Vorschlägen herauszufiltern.

Die zeitliche Gliederung eines Projekts ist im Groben durch die verschiedenen Phasen wie Planung, Ausschreibung, Vergabe, Ausführung, Übergabe und Nutzung vorgegeben. Eine weitere Unterteilung von Arbeitspaketen erfolgt dann mit Hilfe von Terminplänen, die unterschiedlichste Formen, vom Balkenplan über den Netzplan bis hin zu Liniendiagrammen und einfachen Terminlisten, annehmen können.

Problemlösungszyklen sind im Bauingenieurwesen bei sehr vielen Fragestellungen notwendig, da meist unterschiedliche Bereiche des Systems/Projekts gegenseitigen Einfluss aufeinander ausüben.

Werden zur Problemlösung numerische Berechnungsverfahren eingesetzt, muss für die Interpretation und Überprüfung der Ergebnisse sowie für die Eingabe der Inputparameter entsprechendes Fachwissen und Verständnis der Beteiligten vorausgesetzt werden. Manche Problemstellungen können nur durch iterative Berechnungen, in mehreren Durchläufen und nur durch ständige Verbesserung und Überarbeitung gelöst werden. In der Bauausführung erfolgt dieser Zyklus durch Soll-Ist-Vergleiche, die sich auf Kosten, Zeit und Qualität konzentrieren, um die Projektziele zu erreichen. Bei Abweichungen zwischen Soll und Ist sind (Gegen-)Steuerungsmaßnahmen zu ergreifen.

Die systematische Vorgehensweise des Systems Engineering hilft dabei einen Fahrplan für Projekte festzulegen und komplexe Aufgaben durch die Gliederung in Teilpakete überschaubar und damit bewältigbar zu machen.

Auch für den Umgang mit Unsicherheiten ist ein solches systematisches Vorgehen unerlässlich. Werden bei Kalkulationen die Bandbreiten der möglichen Inputwerte nicht berücksichtigt und nur deterministische Werte unsystematisch miteinander kombiniert, können die damit verbundenen Chancen und Risiken nicht eingeschätzt werden. Durch die Anwendung der Monte-Carlo-Simulation können Unsicherheiten systematisch in die Berechnungen integriert werden. Im Sinne des SE ist es dabei sinnvoll vom Groben zum Detail vorzugehen und nur wesentliche kalkulatorische Elemente mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen zu belegen.

## 1.4 Abgrenzung und Einordnung der Arbeit

Die Einordnung der vorliegenden Arbeit erfolgt anhand eines dreidimensionalen Forschungsprofils (siehe Abb. 1-5). Der Problemlösungshorizont bezieht sich auf eine methodische Lösung, die auf einen Einzelfall angewendet wird und sowohl theoretische als auch praktische Umsetzungsgrade aufweist.

Für diese Arbeit werden alle Berechnungen auf die Stahlbetonarbeiten (Einzelfall) bezogen, die bei vielen Bauprojekten einen wesentlichen Kostenanteil verursachen und auch meist am kritischen Weg für die Gesamtbauzeit liegen. Die gezeigte Systematik bzw. Vorgehensweise der Arbeit kann aber auch auf Gesamtsysteme übertragen werden. Beispielhaft kann hier die Berechnung von Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung von Unsicherheiten genannt werden.<sup>31</sup>

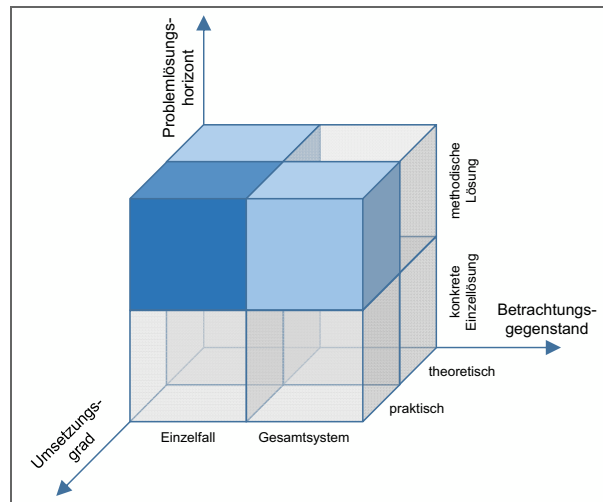


Abb. 1-5 Forschungsprofil<sup>32</sup>

Produktivitätsverluste sind bei Bauprojekten häufig die Quelle für Mehrkosten und/oder Bauzeitverzögerungen und in der Folge auch Streitgegenstand von Gutachten und Gerichtsverfahren. In der Praxis wird meist die Annahme getroffen, dass bei Änderung der Einflussgrößen, die Aufwandswerte konstant bleiben und die Leistung sich damit linear verhält. Für die Ermittlung und Berechnung von Produktivitätsverlusten gibt es in der Literatur wenige Ansätze. Dabei wird großteils nur ein Einfluss auf eine bestimmte Teilproduktivität betrachtet. Über die Bauzeit treten jedoch zum Teil mehrere Störungen gleichzeitig auf, wodurch sich die einzelnen Produktivitätsverluste gegenseitig beeinflussen und deren Auswirkungen damit verstärken. Neben der reinen Addition dieser Einflüsse kommt es aber auch zu gegenseitigen Beeinflussungen und „Aufschaukelungen“, die es erforderlich machen, eine vertiefte Betrachtung durchzuführen.

<sup>31</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2015). Application of the Monte-Carlo Method to Calculate the Life-Cycle Costs of Bridges. S. 751ff

<sup>32</sup> In Anlehnung an Verkuil/Dey (2010). Forschungsverständnis im Kontext anwendungsorientierter Wissenschaften (F&E). S. 7f und Motzko/Westerkamp (2014). Forschungsmethoden für Ingenieure – Methoden der Sozialforschung im Baubetrieb. Folie 10f

Es wird gezeigt, wie die Aggregation von unterschiedlichen Produktivitätsverlusten – bezogen auf die Stahlbetonarbeiten – durchgeführt werden kann. Mit dem Modell sind in weiterer Folge sowohl deterministische als auch probabilistische Untersuchungen möglich, wobei die nichtlinearen Zusammenhänge zwischen der Änderung der Einflussparameter und den daraus resultierenden Produktivitätsverlusten berücksichtigt werden. Das Chancen- bzw. Risikopotential kann bei probabilistischen Betrachtungen anhand von Verteilungsfunktionen ermittelt und Entscheidungen unter Einbeziehung eines definierten Sicherheitsniveaus getroffen werden. Ziel ist es, den Einsatz der Produktionsfaktoren zu optimieren und verursachungsgerechte Kosten zu ermitteln, wenn ein „normaler“ Einsatz der Ressourcen nicht möglich und mit Produktivitätsverlusten zu rechnen ist.

Im Zentrum der Betrachtungen steht dabei vor allem der Hochbau und hier besonders die Stahlbetonarbeiten. Die gezeigten Überlegungen und die angewendete Systematik kann aber auch auf andere Bereiche (z.B. Tunnelbau, Anlagenbau) umgelegt werden.

## 1.5 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Dissertation ist in zehn Kapitel gegliedert. Die Struktur dieser Arbeit mit den inhaltlichen Zusammenhängen und der Phaseneinteilung nach Systems Engineering sind in Abb. 1-6 und Abb. 1-7 dargestellt.

Der Rahmen der Arbeit wird durch die Einleitung (Kap. 1) und die Zusammenfassung (Kap. 9) gebildet. Die weiteren Kapitel sind nach der Methodik des Systems Engineering unterteilt in eine zweiteilige Vorstudie (Kap. 2 und Kap. 3), eine zweiteilige Hauptstudie (Kap. 4 und Kap. 5), eine Detailstudie (Kap. 6) sowie den Systembau (Kap. 7) und die Systemeinführung anhand eines Anwendungsbeispiels (Kap. 8). Kap. 10 enthält das Literaturverzeichnis, welches nach Publikationsarten unterteilt ist.

In Kapitel 2 werden Grundlagen zum Risikoverständnis und zur Verwendung der Begriffe „Risiko“ und „Chance“ im allgemeinen Sprachgebrauch, in der Wirtschaft und speziell in der Bauwirtschaft betrachtet. Ergebnisse einer ExpertInnenbefragung zum Verständnis der Begriffe in der Bauwirtschaft werden präsentiert und es erfolgt eine Einteilung der Begriffe „Unsicherheit“, „Sicherheit“, „Unwissen“, „Ungewissheit“, „Risiko“ und „Chance“ unter die mögliche Erwartungsstruktur. Risiko und Chance werden für diese Arbeit als horizontal gleichwertige Begriffe aufgefasst, bei denen die Auswirkungen und Eintrittswahrscheinlichkeiten (objektiv oder auch subjektiv) bekannt sind. Weiters wird auf das Grundverständnis bei der Wahl der Bezugsbasis – die das Verhältnis zwischen Risiko und Chance definiert – eingegangen. Am Ende des Kapitels werden Begriffe, die häufig im Zusammenhang mit Risikomanagement und Unsicherheiten verwendet werden, hinsichtlich der Einflüsse von innen (Entscheidungen) und außen (Umstände die von den Projektbeteiligten nicht beeinflusst werden können) eingeordnet.

Im dritten Kapitel werden für diese Arbeit wichtige Kennzahlen – wie Produktivität, Aufwandswerte und Leistung – definiert und der Zusammenhang dargestellt.

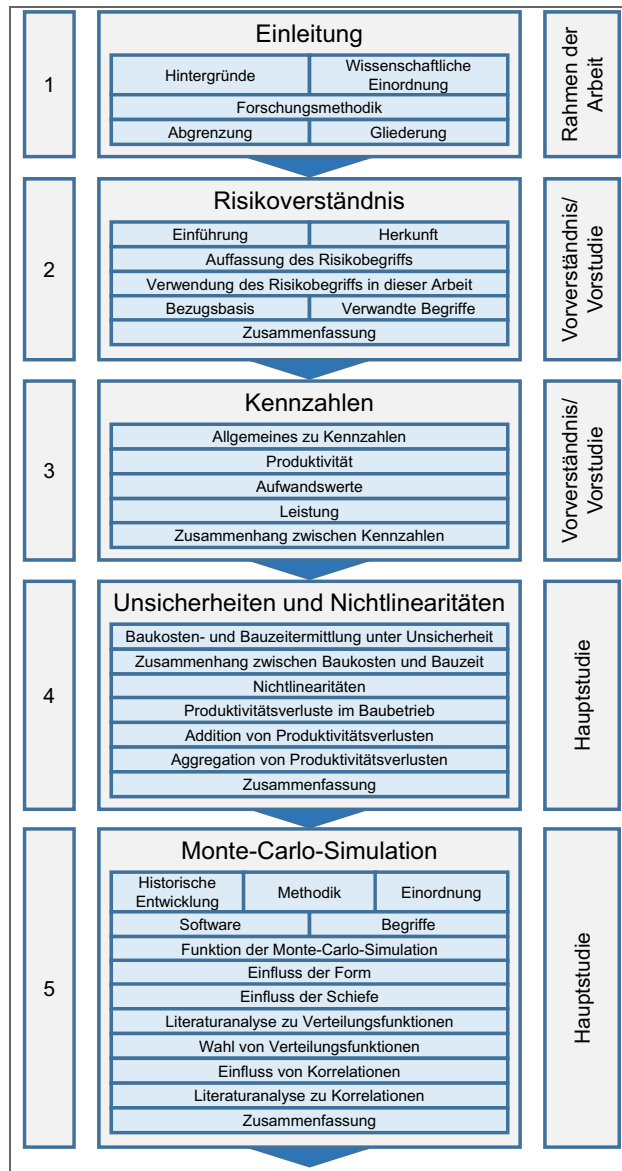


Abb. 1-6 Gliederung der Arbeit – Teil 1

Im vierten Kapitel wird zunächst auf den qualitativen Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeiten eingegangen und aufgezeigt, dass die Annahme linearer Zusammenhänge bei Berechnungen mit Aufwandswerten ein zu einfaches Modell der Realität darstellt. Wird ein linearer Verlauf der Leistung bei Änderung der Einflussgrößen vorausgesetzt, bedeutet dies im Umkehrschluss, dass von konstanten Aufwandswerten – unabhängig von den Einflussparametern – ausgegangen wird. Die Veränderung der Aufwandswerte bei geänderten Bedingungen wird durch nichtlineare Kurvenverläufe für Aufwandswerverhöhungen beschrieben. Die Berücksichtigung mehrerer Produktivitätsverluste, die gemeinsam auftreten, kann entweder durch eine reine Addition der Effekte oder über eine Aggregation, die auch die gegenseitige Beeinflussung und Aufschaukelung der Produktivitätsverluste berücksichtigt, erfolgen. In diesem Kapitel werden die Grundlagen zum

Verständnis des nichtlinearen Verhaltens von Aufwandswerten sowie die Addition und Aggregation von Produktivitätsverlusten gezeigt. Neben dem nichtlinearen Verhalten der Aufwandswerte wird auch festgehalten, dass (prognostische) Berechnungen von Baukosten und Bauzeiten immer mit Unsicherheiten verbunden sind. Diese Unsicherheiten können durch den Ansatz von Verteilungsfunktionen für die Inputparameter und mit der Durchführung von probabilistischen Berechnungen (Monte-Carlo-Simulationen) berücksichtigt werden.

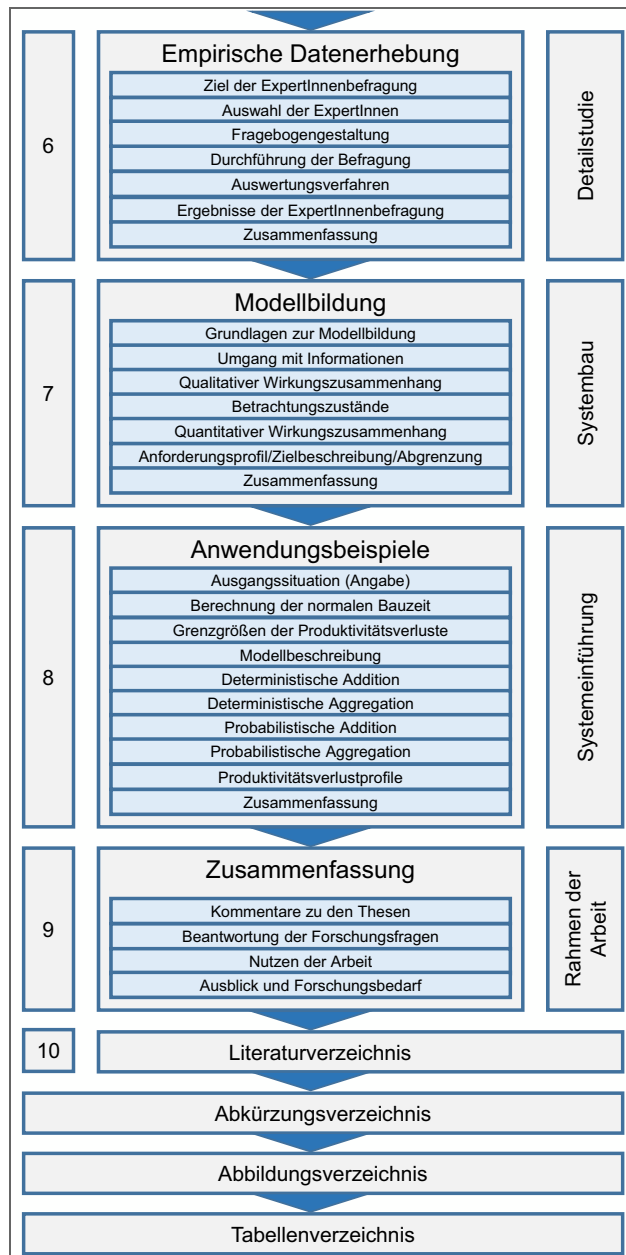


Abb. 1-7 Gliederung der Arbeit – Teil 2

Kapitel fünf enthält Grundlagen zur Monte-Carlo-Simulation sowie zu deren Anwendung. Nach einem kurzen Einblick in die historische Entwicklung und

die Methodik der Monte-Carlo-Simulation erfolgt eine Einordnung in das breite Feld der Mathematik. Weiters werden wichtige Begriffe, die für die Interpretation und für das Verständnis der weiteren Ausführungen zentral sind, erläutert. Die Funktion der Monte-Carlo-Simulation wird anhand eines Beispiels gezeigt, bevor auf den Einfluss der Form und Schiefe von Verteilungsfunktionen als Inputparameter eingegangen wird. Ein Literaturvergleich der in der Bauwirtschaft angewendeten Verteilungsfunktionen wird tabellarisch zusammengefasst und anhand von definierten Unterscheidungskriterien einander gegenübergestellt. Im Anschluss erfolgt die Darstellung unterschiedlicher Erhebungsverfahren, auf deren Basis Verteilungsfunktionen gewonnen werden können. Anhand von einfachen Beispielen wird der Einfluss von Korrelationen auf Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation gezeigt. Eine weitere Literaturanalyse betrachtet den Umgang mit Korrelationen in der Bauwirtschaft. Ausgewählte Literaturansätze werden wiederum tabellarisch anhand definierter Kriterien miteinander verglichen. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung, in welcher der Einsatz deterministischer Berechnungsverfahren (bei vorliegen unsicherer Inputparameter) kritisch hinterfragt, sowie auf die Interpretation von Simulationsergebnissen und die Vor- und Nachteile der Monte-Carlo-Simulation eingegangen wird.

Eine empirische Primärdatenerhebung steht im Zentrum des sechsten Kapitels. Zunächst werden die Ziele der durchgeführten ExpertInnenbefragung angeführt und die Kriterien für die Auswahl der zur Teilnahme eingeladenen ExpertInnen beschrieben. Weiters wird die Fragebogengestaltung und die Durchführung der Befragung beschrieben. Diese wurde in einem ersten Schritt schriftlich durchgeführt und in einem zweiten Schritt durch persönliche oder telefonische Interviews und Fragebogenerörterungen ergänzt. Die Ergebnisse der Umfrage – die sich auf Produktivitätsverluste, den Zusammenhang von Baukosten und Bauzeiten sowie die Korrelationen zwischen den Parametern der Gesamt-Aufwandswertberechnung der Stahlbetonarbeiten beziehen – werden in diesem Kapitel präsentiert und analysiert.

Kapitel sieben beschreibt die Vorgehensweise bei der Modellbildung zur Aggregation von Produktivitätsverlusten. Dazu wird auf den Umgang mit Informationen sowie auf die qualitativen und quantitativen Wirkungszusammenhang eingegangen. Ein Lastenheft, in dem Muss-, Soll- und Kann-Ziele für ein entsprechendes Berechnungsmodell definiert werden, wurde erstellt und ein Pflichtenheft mit konkreten Umsetzungsvorschlägen und Lösungswegen erarbeitet.

Im achten Kapitel wird ein Anwendungsbeispiel für ein konkretes Hochbauprojekt gezeigt. Es werden die Unterschiede zwischen der Addition und der Aggregation von Produktivitätsverlusten aufgezeigt und sowohl deterministische als auch probabilistische Berechnungen durchgeführt. Im Zuge der Berechnungen werden unterschiedliche Kombinationen an Produktivitätsverlusten betrachtet. Basis für diese Kombinationen der Produktivitätsverluste bilden dabei die Ergebnisse der durchgeführten ExpertInnenbefragung.

In Kapitel neun werden die wesentlichen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammenfassend dargestellt und ein Ausblick für zukünftigen Forschungsbedarf gegeben. Das Literaturverzeichnis, welches nach Publikationsarten unterteilt ist, bildet das zehnte und letzte Kapitel dieser Arbeit. Weitere Verzeichnisse sind im Anschluss an Kapitel zehn zu finden.



## 2 Risikoverständnis

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der derzeit vielschichtigen Verwendung des Risikobegriffs in unterschiedlichen Bereichen. Neben der etymologischen Herkunft des Begriffs wird die Verwendung im allgemeinen Sprachgebrauch, in der Wirtschaft und schließlich im Baubetrieb und der Bauwirtschaft aufgezeigt. Eine eindeutige Definition ist in keinem der Bereiche gegeben und es muss für jeden speziellen Fall separat angeführt werden, was unter dem Begriff des Risikos verstanden wird. Besonders die Messbarkeit von Risiken bzw. die Erfassung von subjektiven und objektiven Wahrscheinlichkeiten spielen in vielen Definitionen eine große Rolle. Weiters wird gezeigt, wie unterschiedlich die Ansichten in der Literatur hinsichtlich einer Chancenintegration in den Risikobegriff sind. Dazu werden auch Ergebnisse einer Expertenbefragung – durchgeführt an der Technischen Universität Graz – gezeigt. Schließlich werden die Begriffe Risiko und Chance unter der Gesamtheit der Erwartung, neben Begriffen wie Ungewissheit und Unwissen, eingeordnet und dabei in subjektive und objektive Wahrscheinlichkeiten unterschieden.

### 2.1 Einführung

Liegt ein Risiko oder eine Unsicherheit vor? Wenn es sich um ein Risiko handelt, gibt es dann auch die Möglichkeit einer Chance oder ist das etwas ganz anderes? Sind subjektive Einschätzungen für zukünftige Ereignisse zulässig? Welche Rolle spielen Gefahren dabei, was ist eine Ungewissheit und was hat die Messbarkeit mit all dem zu tun?

Die Verwendung des Risikobegriffs ist durchaus kontrovers und erfordert eine genauere Betrachtung um präzise Aussagen treffen zu können. Speziell im Bauwesen, welches als risikobehaftete Branche gilt, ist – auch wenn das Risikomanagement noch am Beginn der flächendeckenden Umsetzung steht – keine eindeutige Verwendung der Begrifflichkeit gelungen.

Unsichere Einflüsse auf ein Bauprojekt sind in Abb. 2-1 demonstrativ dargestellt. Im Zentrum der Abbildung steht das Bauprojekt, welches das Ergebnis einer Vielzahl von Prozessen (symbolisiert durch Puzzlesteine) darstellt. Der innerste Kreis zeigt jene Parameter, die den Haupteinfluss auf die Arbeitsvorbereitung und die Kalkulation haben. Im nächsten Kreis sind die Umstände der Leistungserbringung sowie Einflussgrößen im Umfeld des Bauobjekts eingetragen. Der vorletzte Kreis beinhaltet Beteiligte eines Bauprojekts (externe und interne Stakeholder), auf die nicht direkt eingewirkt werden kann sowie vertragliche Vereinbarungen, die auf gegenseitigem Einverständnis beruhen und daher auch nur bedingt beeinflusst werden können. Der äußerste Kreis enthält Einflussfaktoren, die von den Projektbeteiligten nicht beeinflusst werden können.

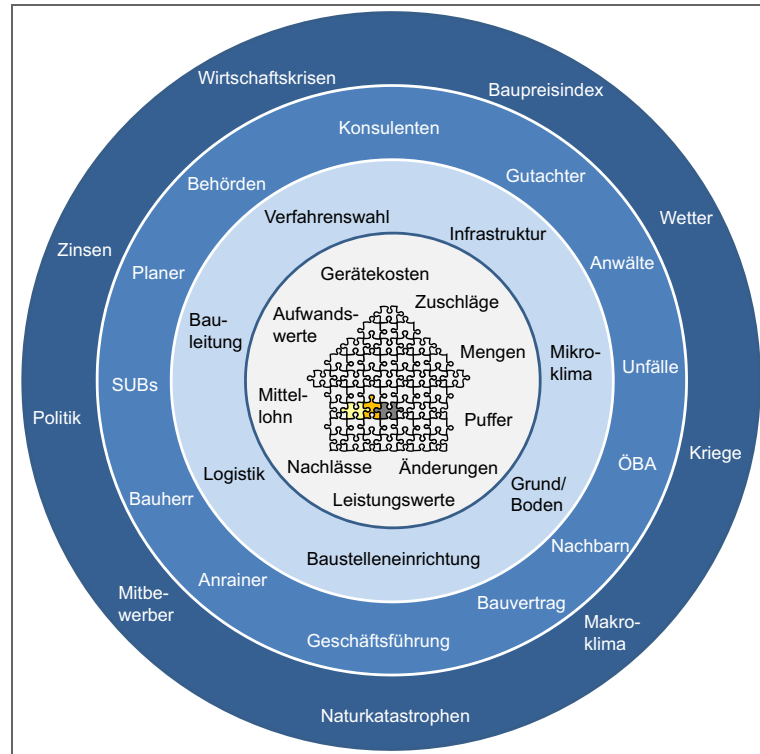


Abb. 2-1 Unsichere Einflüsse auf ein Bauprojekt (demonstrative Aufzählung)

Risiken können bei ihrem Eintritt unterschiedliche Auswirkungen hervorrufen (z.B. Kosten, Terminverzögerungen), erfassbar oder nicht erfassbar sein, unterschiedliche Methoden der Risikobewältigung erfordern, intern oder extern auftreten usw. – eine Gliederung ist daher sinnvoll. In der Literatur finden sich unterschiedliche Vorschläge, Risiken zu gliedern.

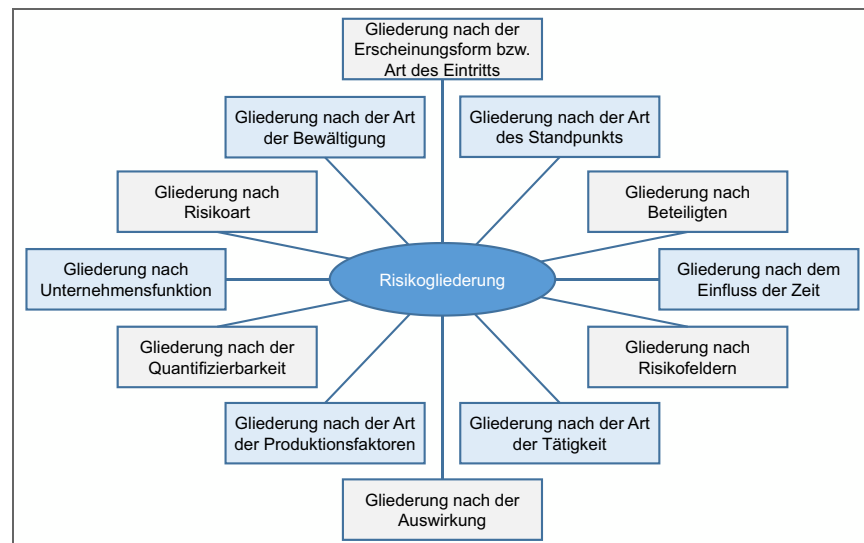


Abb. 2-2 Gliederung von Risiken

Wesentlich ist, dass ein und dasselbe Risiko, je nach gewählter Systematik, in verschiedenen Gruppen auftauchen kann. Wird jedoch keine, wie auch immer geartete Gliederung eingeführt, ergibt sich eine unkontrollierbare Anhäufung sich gegenseitig beeinflussender und überlagernder Faktoren, die keine Rückschlüsse auf die Summe der Risiken zulässt.<sup>1</sup>

Abb. 2-2 zeigt eine demonstrative Aufzählung von Gliederungsmöglichkeiten für Risiken. Die Gliederungsmöglichkeiten haben jeweils Vor- und Nachteile, auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird. Es wird an dieser Stelle auf die einschlägige Fachliteratur des Risikomanagements verwiesen.

Dieses Kapitel liefert einen Überblick über die breite Uneinigkeit in der Auffassung der Begriffe im Zusammenhang mit bevorstehenden Ereignissen und Entwicklungen, strukturiert die möglichen Sichtweisen und gibt am Ende Empfehlungen für eine mögliche zukünftige Verwendung der Begriffe.

Es erfolgt eine Darstellung der Verwendung des Risikobegriffs im allgemeinen Sprachgebrauch, in der Wirtschaft und schließlich im Baubetrieb und der Bauwirtschaft. Weiters werden die Quellen für Risiken im Zuge der Abwicklung von Bauprojekten gezeigt. Zu diesem Zweck werden wesentliche Literaturstellen angeführt, verglichen und kommentiert.

Durch den Umstand, dass die Baubeteiligten ihrem Handeln und ihren Entscheidungen nicht eine große Anzahl an Versuchen voranstellen können und somit auf Literaturwerte, Erfahrungen und ExpertInnenwissen für ihre Vorhersagen und Prognosen zurückgreifen müssen, wird näher auf die Einschätzung von Wahrscheinlichkeiten eingegangen.

Der Beitrag schließt mit einer zusammenfassenden Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse.

## 2.2 Herkunft

Die Begriffe „Unsicherheit“, „Risiko“ oder „Ungewissheit“ werden in vielen Bereichen des täglichen Lebens aber auch in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen verwendet. Eine klare Definition bzw. eine unmissverständliche Verwendung der Begriffe ist allerdings bisher nicht 100%ig gelungen. Obwohl es viele (verschiedene) Definitionen gibt, muss dennoch vor der Verwendung eine Klarstellung erfolgen, was im konkreten Fall mit dem zentralen Begriff des Risikos, aber auch mit verwandten Begriffen wie „Unsicherheit“, „Ungewissheit“, „Gefahr“, „Chance“ etc. gemeint ist.

Die Herkunft des Begriffs „Risiko“ ist nicht restlos geklärt. Die Etymologie<sup>2</sup> weist aber im Grunde zwei Ansätze auf (siehe Abb. 2-3). Einerseits wird der Begriff auf das italienische Wort „rischiare“ und weiter auf das lateinische „risicare“ zurückgeführt. Damit wird „die Klippe, die zu umschiffen ist“, ein „gefährlicher Felsen“ bzw. allgemein ein „gewagtes Unternehmen“ beschrieben. Damit ist das Risiko in dieser Auffassung etwas menschlich Produziertes, das dabei entsteht, einer Gefahr auszuweichen, die prinzipiell vermeidbar gewesen wäre. Andererseits gründet sich der zweite Ansatz auf dem griechischen Wort „riza“ („ρίζα“), das auf den arabischen Ausdruck

<sup>1</sup> Vgl. Schubert (1971). Die Erfassbarkeit des Risikos der Bauunternehmung bei Angebot und Abwicklung einer Baumaßnahme. S. 15

<sup>2</sup> Etymologie ist die Lehre von Ursprung und Geschichte der Wörter.

„rizq“ zurückzuführen ist. Bei diesen Begriffen handelt es sich um eine vorgegebene Übermacht, der man ausgesetzt ist – auch als Schicksal bezeichnet. Sie beinhalten eine Mischung aus Positivem (Chance) und Gefahr und sind auch eng mit dem Begriff der Angst verbunden. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen den beiden etymologischen Ansätzen ist die Beeinflussbarkeit.<sup>3</sup>

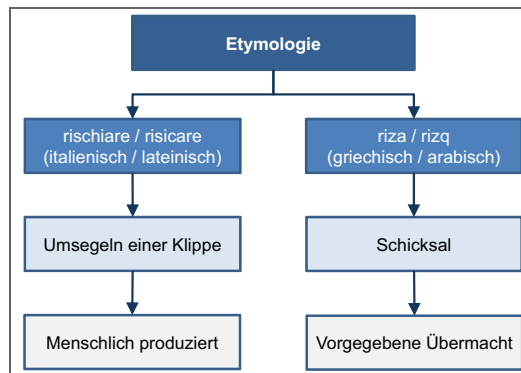


Abb. 2-3 Etymologie des Risikobegriffs<sup>4</sup>

Historisch wird der Begriff des Risikos auch mit der Seefahrt und dem Handel verknüpft. Vor allem Seeversicherungen mussten sich mit dem Risiko auseinandersetzen und auch entsprechende Verträge aufsetzen. Es wurde dazu auf die, schon zur Zeit der Römer dafür verwendete Wette, zurückgegriffen. Die Zufälligkeit von Ereignissen bzw. die Wette auf deren Eintritt oder Nichteintritt konnte auch auf die Seeversicherung übertragen werden.<sup>5</sup>

## 2.3 Verwendung und Auffassung des Risikobegriffs

Nachfolgend wird auf die unterschiedlichen Verwendungen und Auffassungen des Risikobegriffs im allgemeinen Sprachgebrauch, in der Wirtschaft und speziell im Baubetrieb und der Bauwirtschaft eingegangen.

### 2.3.1 Allgemeiner Sprachgebrauch

Um die Bedeutung von bestimmten Begriffen herauszufinden genügt oft ein Blick in ein lexikalisches Standardwerk wie etwa den Brockhaus. Darin wird der Begriff des Risikos wie folgt definiert:

„[...] Verlustgefahren, Unsicherheits- und Zufälligkeitsfaktoren, die mit jeder wirtsch. Tätigkeit verbunden sind. Unterschieden werden natürl. Risiken (z.B. Sturmschäden), techn. Risiken (z.B. Produktionsmängel), soziale Risiken (z.B. Fluktuation), persönl. Risiken (z.B. Krankheit), polit. Risiken (z.B. Verstaatlichung) und bes. Marktrisiken (z.B. Konjunkturunbruch, Branchenkrise). [...]“<sup>6</sup>

<sup>3</sup> Vgl. Jonen (2007). Semantische Analyse des Risikobegriffs – Strukturierung der betriebswirtschaftlichen Risikodefinitionen und literaturempirische Auswertung. S. 4f

<sup>4</sup> Vgl. Jonen (2007). Semantische Analyse des Risikobegriffs – Strukturierung der betriebswirtschaftlichen Risikodefinitionen und literaturempirische Auswertung. S. 5

<sup>5</sup> Vgl. Luhmann (1991). Soziologie des Risikos. S. 18

<sup>6</sup> F.A. Brockhaus GmbH (1999). Brockhaus in fünfzehn Bänden – Band 11 – Pfe-Rog. S. 464

Gigerenzer hält fest, dass die Begriffe „Risiko“ und „Ungewissheit“ in der Alltagssprache meist synonym verwendet werden, meint aber auch, dass für eine Entscheidung unter Risiko Denken und Logik ausreichen, da die beste Entscheidungsoption berechnet werden kann. Es wird also vorausgesetzt, dass die Auswirkungen und die Wahrscheinlichkeiten bekannt sind. In einer ungewissen Entscheidungssituation ist nicht alles bekannt und es sind Faustregeln und Intuition (Heuristiken) erforderlich. Bei Glücksspielen wie etwa Automaten, Lotterien u.ä. liegt nach Gigerenzer ein Risiko vor, da die Wahrscheinlichkeit eines Gewinnes berechnet werden kann. Unter dem Begriff der Ungewissheit fallen nach dieser Auffassung z.B. Aktien, Erdbeben, Gesundheit oder allgemein die Wirtschaft.<sup>7</sup>

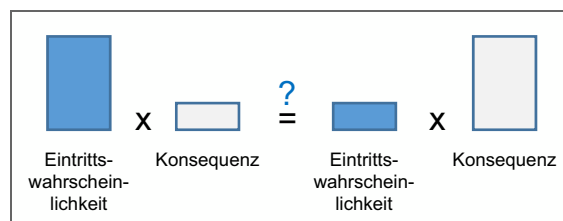
### Risiko als Gleichung

Risiko wird oft mit der einfach anmutenden nachstehenden Gleichung angegeben:

$$\text{Risiko} = \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} \cdot \text{Konsequenz} \quad (2-1)$$

Wird z.B. die Herstellung von 10 Sichtbetonwänden betrachtet, wobei einmal ein Schaden eingetreten ist, würde die Eintrittswahrscheinlichkeit aufgrund historischer Daten bei 10 % (=  $1 / 10 \cdot 100\%$ ) liegen. Der Schaden (= Konsequenz) wird mit 10.000 € abgeschätzt somit ergibt sich das Risiko zu 1.000 € (=  $10.000\text{ €} \cdot 10\% / 100\%$ ). Dieser Wert könnte als Wagnisaufschlag in der Kalkulation berücksichtigt werden. Allerdings ist hier zu beachten, dass der Schaden bei einem Anwendungsfall sehr wohl 10.000 € betragen kann. Das errechnete Risiko gibt hier nur den im Mittel zu erwartenden Wert wieder. Der tatsächliche Schaden wird zwischen 0 und 10.000 € – je nach Qualität der Schätzungen evtl. auch darüber – liegen.

Es stellt sich die Frage, ob unter Anwendung der Glg. (2-1) bei hoher Eintrittswahrscheinlichkeit und niedriger Konsequenz vom gleichen Risiko zu sprechen ist wie bei geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und hoher Konsequenz (siehe Abb. 2-4).



**Abb. 2-4** Vergleichbarkeit von Risiken unter Anwendung der Risikogleichung

Yoe schlägt vor, sich diese Gleichung mehr als ein Gedankenmodell vorzustellen, das dabei hilft über Risiken nachzudenken, als eine Formel, die Risiken tatsächlich beschreibt. Es geht hauptsächlich darum, dass beide Komponenten obenstehender Gleichung vorhanden sein müssen, damit überhaupt ein Risiko vorherrscht. Jede Konsequenz, egal wie gravierend sie auch sein mag, stellt kein Risiko dar, wenn sie keine Wahrscheinlichkeit des Eintretens hat.<sup>8</sup>

<sup>7</sup> Vgl. Gigerenzer (2013). Risiko – Wie man die richtigen Entscheidungen trifft. S. 38

Den Begriff des Risikos beschreibt Yoe als ein Maß der Wahrscheinlichkeit und Konsequenz von ungewissen zukünftigen Ereignissen. Es besteht demnach die Möglichkeit eines unerwünschten Ergebnisses. Wobei unter „Ergebnis“ sowohl ein Verlust (z.B. durch Feuer, Flut, Krankheit, Tod, finanzielle Rückschläge) oder jede Form von Gefahr („hazard“)<sup>9</sup> als auch ein potentieller Nutzen, der nicht realisiert werden konnte (z.B. ein neues Produkt setzt sich nicht so durch wie erhofft, ein Investment liefert nicht die erwarteten Gewinne bzw. jede Form einer verpassten Chance), gemeint sein kann. Was diese Möglichkeit eines unerwünschten Ereignisses begründet, ist das Fehlen von Informationen. Dieses Fehlen ist durch die grundlegende Ungewissheit der Zukunft gegeben.<sup>10</sup>

Auch Kaplan/Garrick stufen die Darstellung des Risikos wie in Glg. (2-1) als irreführend ein, da dies dazu führen würde, dass ein Szenario, für das eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit vorliegt, jedoch ein sehr hoher Schaden zu erwarten ist, das gleiche Risiko aufweist wie ein Szenario bei dem die Eintrittswahrscheinlichkeit sehr hoch, die Konsequenzen aber sehr gering sind. Zwei solche Szenarien können aber in keinem Fall als gleich risikobehaftet angesehen werden.<sup>11</sup>

Eine mögliche Darstellungsform, bei der Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenz nicht in einer Zahl zusammengefasst werden (vgl. Glg. (2-1)), sind Risikomatrizen bzw. Portfolio-Methoden (Risikolandkarten).

### Risiko vs. Sicherheit

Risiko wird oft mit dem Begriff der Sicherheit verwechselt. Es wird versucht „Sicherheit“ zu gewährleisten und auch viele öffentliche Verhaltensweisen („public policies“) haben die „Sicherheit“ als Ziel. Das Problem dabei ist jedoch, dass Grenzen festgelegt werden müssen, bis zu denen eine Veränderung und die damit einhergehenden Auswirkungen noch als sicher gelten. Diese Grenzen basieren somit auf rein subjektiven Entscheidungen und können nicht befriedigend sein. Sicherheit beinhaltet auch immer ein Restrisiko („residual risk“) und stellt somit lediglich eine psychologische Fiktion dar.<sup>12</sup>

### Risiko vs. Chance

In anderen Sprachen und Kulturen ist eine Trennung zwischen den Begriffen Risiko und Chance nicht klar erkennbar. Im angloamerikanischen Raum wird bei Vorliegen von Chancen und Risiken auch von „Upside Risk“ und „Downside Risk“ gesprochen. Das chinesische Wort für „Krise“ lautet „Weiji“ und besteht aus zwei Schriftzeichen, die einzeln betrachtet die Worte „Gefahr“ und „Chance“ bilden. Eine Krise oder eine schwierige Situation bietet damit sowohl die Möglichkeit einer Gefahr als auch einer Chance.

### Risiko vs. Gefahr

Eine Unterscheidung zwischen Risiko und Gefahr wird darin gesehen, dass beim Risiko ein möglicher Schaden auf eine Entscheidung zurückzuführen

<sup>8</sup> Vgl. Yoe (2012). Primer on Risk Analysis – Decision Making under Uncertainty. S. 1

<sup>9</sup> Als Gefahr („hazard“) gilt in einem allgemeinen Sinn alles, was eine potenzielle Quelle für Schaden an einem geschätzten Vermögenswert (menschlich, tierisch, naturgemäß, wirtschaftlich, sozial) darstellt. Sie beinhaltet alle biologischen, chemischen, physischen und radiologischen Ursachen oder natürliche/anthropogene Ereignisse, die im Stande sind nachteilige Effekte auf Menschen, Eigentum, Wirtschaft, Kultur, soziale Strukturen oder die Umwelt auszuüben. Vgl. Yoe (2012). Primer on Risk Analysis – Decision Making under Uncertainty. S. 2

<sup>10</sup> Vgl. Yoe (2012). Primer on Risk Analysis – Decision Making under Uncertainty. S. 1

<sup>11</sup> Vgl. Kaplan/Garrick (1981). On The Quantitative Definition of Risk. In: Risk Analysis Vol. 1 (1). S. 13

<sup>12</sup> Vgl. Yoe (2012). Primer on Risk Analysis – Decision Making under Uncertainty. S. 4

ist, während bei der Gefahr ein etwaiger Schaden extern veranlasst wird (vgl. etymologische Ansätze in Abb. 2-3). Wählt man jedoch zwischen zwei sehr ähnlichen Alternativen (zwei Fluggesellschaften – ein Flugzeug stürzt ab), hat man sich nicht zwingend für die riskantere entschieden, sondern es hat sich eine Gefahr realisiert. Die Alternativen müssen sich also in ihrer Möglichkeit für Schäden deutlich unterscheiden.<sup>13</sup>

Könnte man also jede Gefahr durch eine Entscheidung in ein Risiko verwandeln? Diese Frage ist nicht einfach zu klären, da es auch immer auf den Standpunkt des Beobachters ankommt. Was für den Entscheider ein Risiko darstellt, das er aufgrund von Entscheidungen (oder Nicht-Entscheidungen) eingegangen ist, stellt für Betroffene eine Gefahr dar, da sie einem möglichen Schaden nicht mit einer direkten Entscheidung begegnen können.<sup>14</sup> Der Geschädigte hat die Gefahr, die ihn bedroht, nicht selbst durch eine Entscheidung erzeugt, denn sonst wäre es ein Risiko.<sup>15</sup>

Sowohl bei der Unterscheidung Risiko/Sicherheit als auch bei Risiko/Gefahr spiegelt der Begriff des Risikos einen sehr komplexen Sachverhalt wider, während die Gegenseite als Reflexionsbegriff dient. Beim Vergleich von Risiko/Sicherheit geht es darum das Messungsproblem festzuhalten und bei Risiko/Gefahr steht die Entscheidung im Mittelpunkt.<sup>16</sup> Für beide Unterscheidungen gilt jedoch, dass es kein risikofreies Verhalten gibt. Im einen Fall bedeutet dies, dass es keine absolute Sicherheit gibt. Im anderen Fall, dass Risiken nicht vermieden werden können. Überholt man in einer unübersichtlichen Kurve wie empfohlen nicht, hat man – bei genauer Betrachtung – das Risiko nicht so schnell voranzukommen wie wenn man das Manöver gewagt hätte.<sup>17</sup>

„Man kann nur riskant entscheiden – oder abwarten. Und die Form des Risikos besagt, daß auch das Abwarten eine riskante Entscheidung ist.“<sup>18</sup>

Die angeführten Definitionen spiegeln eine vorwiegend negativ behaftete Auffassung des Begriffs Risiko wider. Kognitiv besteht also offensichtlich eine Verknüpfung zwischen Risiko und negativen Folgen (Schaden, Verlust, entgangene Chance etc.). Wie wird der Risikobegriff aber in der Wirtschaft gesehen? Dieser Frage wird im nächsten Abschnitt nachgegangen.

### 2.3.2 Verwendung in der Wirtschaft

Bei der Verwendung des Begriffs in wirtschaftlichen Belangen kommt es nicht mehr nur auf das reine sprachliche Verständnis des Wortes an, sondern die Messbarkeit der beiden Komponenten (Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenz – vgl. Glg. (2-1)) rückt in den Fokus der Definitionen.

Jonen untersuchte mit Hilfe eines semantischen Kastens insgesamt 329 Risikodefinitionen aus den unterschiedlichsten – hauptsächlich deutschsprachigen – Quellen (betriebswirtschaftliche Bücher, Zeitschriften, Sammelbände etc.).<sup>19</sup> Es konnte dabei ein starker Anstieg der Anzahl an Definitionen in den letzten Jahren festgestellt werden.<sup>20</sup> Weiters zeigt die Untersuchung

<sup>13</sup> Vgl. Luhmann (1991). Soziologie des Risikos. S. 30ff

<sup>14</sup> Vgl. Luhmann (1991). Soziologie des Risikos. S. 36f

<sup>15</sup> Vgl. Luhmann (1991). Soziologie des Risikos. S. 112

<sup>16</sup> Vgl. Luhmann (1991). Soziologie des Risikos. S. 32

<sup>17</sup> Vgl. Luhmann (1991). Soziologie des Risikos. S. 37

<sup>18</sup> Luhmann (1991). Soziologie des Risikos. S. 81

<sup>19</sup> Vgl. Jonen (2007). Semantische Analyse des Risikobegriffs – Strukturierung der betriebswirtschaftlichen Risikodefinitionen und literaturempirische Auswertung. S. 39ff

ab ca. 1940 eine Zunahme des subjektiven Wahrscheinlichkeitsbegriffs in den Definitionen und auch der relative Anteil der Chancennennungen stieg in den letzten Jahren moderat an. Zu beachten ist bei der Untersuchung von Jonen, dass ca. 87 % der Definition aus dem Bereich der Betriebswirtschaftslehre stammen.<sup>21</sup>

Für wirtschaftliche Belange gilt die Definition von Knight als eine Art Dogma, die in sehr vielen Arbeiten, die sich mit Risiken oder Risikomanagement befassen, zitiert wird. Die Definition nach Knight geht auch aus der Erhebung von Jonen als jene mit den meisten Referenzierungen und jene mit vielen Nennungen als Ursprung einer neuen Definition hervor.<sup>22</sup> Dies führte dazu, dass neuen begrifflichen Innovationen vorgeworfen wurde, die Begriffe nicht richtig zu verwenden.<sup>23</sup> Knight sieht die Unsicherheit als Überbegriff für Risiko und Ungewissheit. Können quantitative Messungen vorgenommen werden, spricht man von Risiko, ansonsten von Ungewissheit (siehe Abb. 2-5).

Es ist also nach Knight für Ungewissheiten nicht möglich objektive quantitative Wahrscheinlichkeiten für einen Ereigniseintritt anzugeben. Gründe dafür können einerseits zu wenige Erfahrungswerte, andererseits ein einzigartiges Auftreten<sup>24</sup> sein.<sup>25</sup>

Demnach handelt es sich um „Ungewissheiten“, wenn zwar die Auswirkungen bekannt sind, die Eintrittswahrscheinlichkeiten jedoch nur geschätzt werden können.

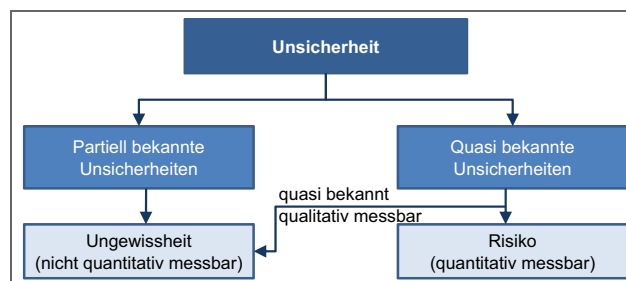


Abb. 2-5 Gliederung von Unsicherheiten lt. Knight<sup>26</sup>

Die Messbarkeit bzw. Quantifizierbarkeit ist in vielen Definitionen ein zentrales Thema. Das Vorliegen von messbaren oder nicht messbaren Eintrittswahrscheinlichkeiten wird oft als Kriterium für eine Unterscheidung in Risiko und Ungewissheit herangezogen.

Dem Verständnis von Wahrscheinlichkeit liegen grundsätzlich zwei verschiedene Betrachtungsweisen zugrunde. Einerseits die „objektive“ oder „frequentistische“ Betrachtung, die ihr Verständnis für Wahrscheinlichkeit aus sich wiederholenden Experimenten (z.B. Münzwurf) bezieht. Andererseits das „subjektive“ Verständnis von Wahrscheinlichkeit, welches einen

<sup>20</sup> Die untersuchten Begriffsdefinitionen stammen aus Quellen zwischen 1903 und 2006.

<sup>21</sup> Vgl. Jonen (2007). Semantische Analyse des Risikobegriffs – Strukturierung der betriebswirtschaftlichen Risikodefinitionen und literaturempirische Auswertung. S. 39ff

<sup>22</sup> Vgl. Jonen (2007). Semantische Analyse des Risikobegriffs – Strukturierung der betriebswirtschaftlichen Risikodefinitionen und literaturempirische Auswertung. S. 42ff

<sup>23</sup> Vgl. Luhmann (1991). Soziologie des Risikos. S. 9

<sup>24</sup> Anmerkung: wie die Erstellung eines Bauwerks als Unikat

<sup>25</sup> Vgl. Boeckelmann/Mildner (2011). Unsicherheit, Ungewissheit, Risiko – Die aktuelle wissenschaftliche Diskussion über die Bestimmung von Risiken. S. 2

<sup>26</sup> Wiggert (2009). Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen. S. 71



Wissensstand, einen Grad des Glaubens oder einen Stand der Zuversicht widerspiegelt.<sup>27</sup>

Knight definiert weiters drei Arten von Wahrscheinlichkeitssituationen:<sup>28</sup>

- A Priori Wahrscheinlichkeit (logisch gewonnen)
- Statistische Wahrscheinlichkeit (empirisch gewonnen)
- Geschätzte Wahrscheinlichkeit

Logische und empirische Wahrscheinlichkeiten fasst Knight dabei unter dem Begriff „Risiko“ zusammen. Die Situation der geschätzten Wahrscheinlichkeiten kann unter dem Begriff der „Ungewissheit“ dargestellt werden.<sup>29</sup>

Die „Wahrscheinlichkeit“, die sich aus Experimenten ergibt, sollte in dieser Hinsicht besser als „Frequenz“ bezeichnet werden, denn es handelt sich dabei um eine „harte“, messbare, objektive Zahl. Die „Wahrscheinlichkeit“, die sich auf einen gewissen Wissensstand stützt, wird in dieser Hinsicht als „Wahrscheinlichkeit“ bezeichnet. Sie scheint „weich“, wechselhaft, subjektiv und nicht messbar (im herkömmlichen Sinne).<sup>30</sup>

In diesem Zusammenhang kann auch sehr gut die Rolle der Statistik erörtert werden. Die Statistik ist die Studie von frequentistischen Informationen bzw. die Wissenschaft des Umgangs mit Daten. Umgekehrt wird mit Hilfe der Wahrscheinlichkeit der Mangel an Daten behandelt. Die oft gehörte Aussage, dass nicht mit Wahrscheinlichkeiten gerechnet werden kann, da nicht ausreichend viele Daten vorliegen, ist ein Missverständnis. Gerade dann, wenn nur wenige Daten vorhanden sind, bleibt nichts Anderes zu tun als mit Wahrscheinlichkeiten zu rechnen.<sup>31</sup>

Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit ist keine exakte Wissenschaft. Sie basiert auf Branchendaten, früheren Projekten, Risikodatenbanken, Nachkalkulationen, „Post-Mortem-Analysen“<sup>32</sup> oder auch nur auf bloßen Abschätzungen oder Vermutungen. Trotzdem sollte auf diesen Schritt in keiner Weise verzichtet werden, nur weil damit nie nachweislich korrekte Antworten gefunden werden können.<sup>33</sup>

Das Gabler Wirtschaftslexikon definiert den Begriff des Risikos allgemein wie folgt:

„Kennzeichnung der Eventualität, dass mit einer (ggf. niedrigen, ggf. auch unbekanntem) Wahrscheinlichkeit ein (ggf. hoher, ggf. in seinem Ausmaß unbekannter) Schaden bei einer (wirtschaftlichen) Entscheidung eintreten oder ein erwarteter Vorteil ausbleiben kann.“<sup>34</sup>

Diese Darstellung widerspricht der Auffassung nach Knight, bei der Risiken nur bei objektiven Wahrscheinlichkeiten vorliegen. Eine weitere Definition im Gabler Wirtschaftslexikon unter dem Begriff „Risiko“ beschreibt diesen im Zusammenhang mit der Entscheidungstheorie wie folgt:

<sup>27</sup> Vgl. Kaplan/Garrick (1981). On The Quantitative Definition of Risk. S. 17

<sup>28</sup> Vgl. Knight (1971). Risk Uncertainty and Profit. S. 224f

<sup>29</sup> Vgl. Boeckelmann/Mildner (2011). Unsicherheit, Ungewissheit, Risiko – Die aktuelle wissenschaftliche Diskussion über die Bestimmung von Risiken. S. 2

<sup>30</sup> Vgl. Kaplan/Garrick (1981). On The Quantitative Definition of Risk. S. 17f

<sup>31</sup> Vgl. Kaplan/Garrick (1981). On The Quantitative Definition of Risk. S. 18

<sup>32</sup> Dies sind Untersuchungen von gescheiterten Projekten, Fehlschlägen, falschen Entscheidungen etc.

<sup>33</sup> Vgl. DeMarco/Lister (2003). Barentango – Mit Risikomanagement Projekte zum Erfolg führen. S. 67

<sup>34</sup> <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/6780/risiko-v10.html>. Datum des Zugriffs: 29.01.2013

„Entscheidungssituation, bei welcher für das Eintreten von Ereignissen objektive Wahrscheinlichkeiten vorliegen.“<sup>35</sup>

Diese zweite Definition setzt eine objektive Wahrscheinlichkeit für Ereignisse voraus, um über Risiken sprechen zu können. Dies entspricht im Wesentlichen der Theorie von Knight<sup>36</sup>, die eine klare Trennung zwischen „Risiko“ und „Ungewissheit“ („uncertainty“) fordert.

Hier zeigt sich auch das Problem der Übersetzung zwischen deutschsprachiger und englischer Literatur, denn das englische Wort „uncertainty“ kann sowohl mit „Unsicherheit“ als auch mit „Ungewissheit“ übersetzt werden. Ähnliche sprachliche Divergenzen gibt es auch bei der Auffassung von Risiko und Chance (vgl. Upside Risk und Downside Risk).

Laux/Gillenkirch/Schenk-Mathes unterscheiden bei einer möglichen Erwartungsstruktur in Sicherheit und Unsicherheit, wobei im Sinne der Entscheidungstheorie zwischen „Unsicherheit im engeren Sinne“ (was mit dem Begriff „Ungewissheit“ gleichgestellt werden kann) und dem Begriff des Risikos differenziert wird (siehe Abb. 2-6). Nach dieser Auffassung können für Unsicherheiten im engeren Sinne (entspricht der Ungewissheit) auch keine subjektiven Eintrittswahrscheinlichkeiten angegeben werden.

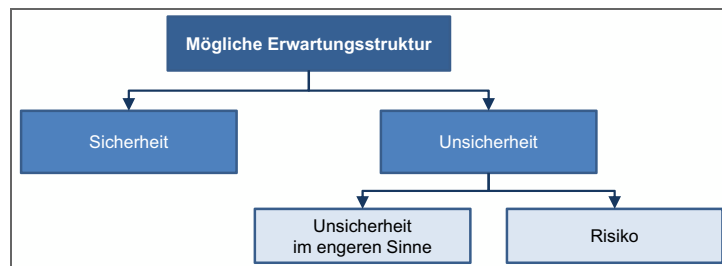


Abb. 2-6 Unsicherheit in der Entscheidungstheorie<sup>37</sup>

Teilweise erfolgt auch eine Trennung in „Risiko im engeren Sinne“ und „Ungewissheit“. Als Oberbegriff wird ebenfalls „Unsicherheit“ verwendet.<sup>38</sup>

Auch das Gabler Wirtschaftslexikon folgt dieser Auffassung dahingehend, dass der Begriff der „Unsicherheit“ als Oberbegriff für „Risiko“ und „Ungewissheit“ gesehen wird.<sup>39</sup>

Von Ungewissheit wird dann gesprochen, wenn für das Eintreten zukünftiger Ereignisse zwar keine objektiven Wahrscheinlichkeiten vorliegen (dabei würde es sich um ein „Risiko“ handeln), aber subjektive Wahrscheinlichkeiten gebildet werden können.<sup>40</sup>

Weitere Definitionen sehen das „Unwissen“ als zusätzlichen Unterpunkt der Unsicherheit an (siehe Abb. 2-7), wobei unter Unwissen Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen nicht (bzw. nicht vollständig) angegeben werden können.

<sup>35</sup> <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/6780/risiko-v10.html>. Datum des Zugriffs: 29.01.2013

<sup>36</sup> Dissertation aus dem Jahre 1921

<sup>37</sup> Vgl. Laux/Gillenkirch/Schenk-Mathes (2012). Entscheidungstheorie. S. 33

<sup>38</sup> Vgl. Gottschalk-Mazouz (2011). Risiko. S. 503

<sup>39</sup> Vgl. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/9325/unsicherheit-v11.html>. Datum des Zugriffs: 12.03.2013

<sup>40</sup> Vgl. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55049/ungewissheit-v3.html>. Datum des Zugriffs: 12.03.2013

Bei Ingenieurproblemen lassen sich Unsicherheiten wie folgt einteilen:

- aleatorische Unsicherheiten (Typ I – inhärente, physikalische Unsicherheiten) und
- epistemische Unsicherheiten (Typ II – Modellunsicherheiten oder statistische Unsicherheiten)

Dabei werden aleatorische Unsicherheiten dadurch hervorgerufen, dass die Welt zufällig ist. Ein Zugewinn an zusätzlichen Informationen reduziert eine aleatorische Unsicherheit nicht. Epistemische Unsicherheiten dagegen entstehen aus einem Mangel an Wissen, einer inadäquaten bzw. ungenauen Modellierung oder aus begrenzten Informationen bzw. einer zu geringen Anzahl an Daten.<sup>41</sup>

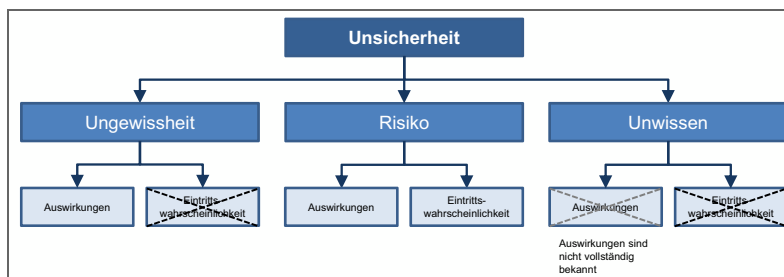


Abb. 2-7 Gliederung von Unsicherheiten<sup>42</sup>

Um einen tieferen Einblick in die Auffassung von Risiken zu erhalten, wird nachfolgend auf die nationale Umsetzung der ISO 31000 – die ONR 49000 „Risikomanagement für Organisationen und Systeme“ – eingegangen. Ziel der internationalen Norm ISO 31000 war es, einen Standard für Risikomanagement und eine einheitliche Sprache zu schaffen. Die ONR 49000:2014 beschreibt den Begriff des Risikos als Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele.

Der Begriff umfasst dabei folgende Aspekte:

- „die Kombination von Wahrscheinlichkeit und Auswirkung,
- die Auswirkungen können positiv oder negativ sein,
- die Unsicherheit bzw. Ungewissheit wird mit Wahrscheinlichkeiten geschätzt bzw. ermittelt,
- die Ziele der Organisation erstrecken sich auf die strategische Entwicklung (zB Kundenbedürfnisse, Innovation, Marktstellung). Die Tätigkeiten umfassen die operativen Aktivitäten (zB Beschaffung, Produktion und Dienstleistung sowie Vertrieb). Die Anforderungen beziehen sich insbesondere auf Gesetze, Normen sowie weitere externe oder interne regulatorische Vorgaben, auch betreffend die Sicherheit von Menschen, Sachen und der Umwelt, und
- Risiko ist eine Folge von Ereignissen (gemäß 2.1.6<sup>43</sup>) oder von Entwicklungen (gemäß 2.1.5<sup>44</sup>).“<sup>45</sup>

<sup>41</sup> Vgl. Köhler (2012). Seminar „Risiko und Sicherheit im Bauwesen“ – 2. Grundlagen Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Bild 33

<sup>42</sup> Hofstadler (2012). Vortrag beim ZT-Forum – Risikofaktor Baugrund – Risikofaktoren aus technischer und stochastischer Sicht. Folie 10

<sup>43</sup> Lt. ONR 49000:2014 ist ein Ereignis ein plötzlicher Eintritt einer bestimmten Kombination von Umständen (= schlagendes Ereignis).

Somit können Wahrscheinlichkeiten sowohl geschätzt (subjektiv) als auch (objektiv) „ermittelt“ werden und Risiken beziehen sich sowohl auf schlagende Ereignisse als auch auf schleichende Entwicklungen. Unsicherheiten von Aussagen, bei denen kausale Zusammenhänge und Hintergründe nur unvollständig bekannt bzw. nur ein Grad an persönlicher Überzeugung sind, werden als subjektive Wahrscheinlichkeiten bezeichnet. Der in der englischen ISO 31000 verwendete Begriff „likelihood“ umfasst sowohl das objektive als auch das subjektive Verständnis.<sup>46</sup>

Weiters sieht die ONR sowohl eine positive als auch eine negative Auswirkung als Teil des Risikos. Positive Auswirkungen sind Gewinne, Vorteile und Nutzen – negative Auswirkungen sind Verluste, Nachteile und Schäden. Bedrohungen bzw. Chancen werden als Quelle von Risiken aufgefasst, die zu einer ungünstigen bzw. positiven Entwicklung führen können.<sup>47</sup>

Unsicherheit und Ungewissheit werden in der ONR 49000:2014 als gleichwertige Begriffe erachtet, die das Fehlen von Informationen bezüglich des Eintritts zukünftiger Ereignisse oder Entwicklungen, ihrer Auswirkungen und ihrer Wahrscheinlichkeit beschreiben.<sup>48</sup>

Die ONR 49000 widerspricht also in wesentlichen Punkten der oft zitierten Definition von Knight (und den darauf aufbauenden Definitionen). Es sind demnach subjektive Wahrscheinlichkeiten zulässig und es werden nicht nur negative sondern auch mögliche positive Auswirkungen in der Begriffsbestimmung des Risikos gesehen.

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Begriffsbestimmung in der Bauwirtschaft und dem Baubetrieb.

### 2.3.3 Verwendung in der Bauwirtschaft

Es stellt sich die Frage, ob die Risikodefinition nach Knight, die eine objektive und quantitative Messbarkeit von Unsicherheiten fordert, für die Bauwirtschaft und den Baubetrieb zu streng ist. Knights Definition des Risikos (und alle darauf aufbauenden) sind sehr stark mit statistischen Aussagen verknüpft, für deren Aussagekraft eine entsprechend große Menge an historischen Daten zur Verfügung stehen muss. Bauprojekte sind jedoch Unikate – objektive (gemessene) Werte für ein exakt gleiches Projekt gibt es damit nicht. Dies würde bedeuten, dass im Zuge von Kalkulationen und Bauzeitermittlungen nie von „Risiken“ die Rede sein dürfte, sondern immer nur von „Ungewissheiten“, da solch ein geforderter Datenpool statistisch nicht greifbar vorliegt. Vorhanden sind aber die Erfahrungen der beteiligten Personen, die aufgrund ähnlicher Projekte Ab- und Einschätzungen durchführen können (und müssen).

Bandbreiten von unsicheren Parametern können entweder objektiv ermittelt, oder subjektiv angesetzt werden (siehe Abb. 2-8). Die Wahrscheinlichkeiten zu jedem Wert innerhalb der definierten Bandbreite muss meist subjektiv

<sup>44</sup> Lt. ONR 49000:2014 ist eine Entwicklung eine allmähliche Veränderung von Umständen (= schleichende Entwicklung).

<sup>45</sup> ONR 49000:2014 – Risikomanagement für Organisationen und Systeme – Begriffe und Grundlagen – Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. S. 7

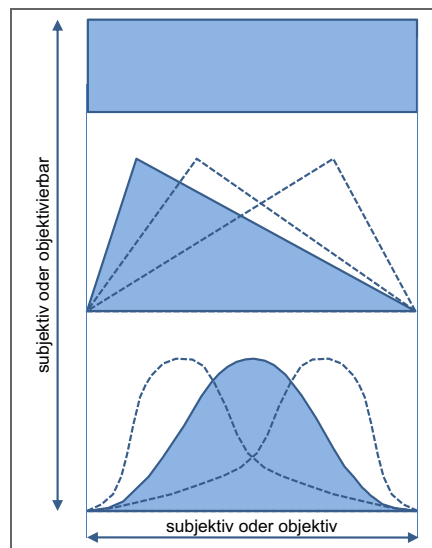
<sup>46</sup> Vgl. ONR 49000:2014 – Risikomanagement für Organisationen und Systeme – Begriffe und Grundlagen – Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. S. 9

<sup>47</sup> Vgl. ONR 49000:2014 – Risikomanagement für Organisationen und Systeme – Begriffe und Grundlagen – Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. S. 5f

<sup>48</sup> Vgl. ONR 49000:2014 – Risikomanagement für Organisationen und Systeme – Begriffe und Grundlagen – Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. S. 9

durch die Wahl von Verteilungsfunktionen abgeschätzt werden. Objektivierbar wird die Wahl von Verteilungsfunktionen für Inputparameter wenn auf Basis vorhandener Daten, Nachkalkulationen, Ergebnissen aus ExpertInnenbefragungen oder Kombinationen daraus, die Form der entsprechenden Verteilung ermittelt wird. Die Anpassung an theoretische Verteilungsfunktionen (Fitting) erfolgt mit Hilfe entsprechender Softwareprogramme.<sup>49</sup>

In Abschnitt 5.10 wird näher auf die Wahl von Verteilungsfunktionen eingegangen.



**Abb. 2-8** Subjektive bzw. objektive Bandbreite – subjektive bzw. objektivierbare Wahrscheinlichkeitsverteilung

Risiken sollten sich demnach nicht nur auf messbare Faktoren beschränken, da ein Risikomanagement, welches nur quantifizierbare Risiken berücksichtigt, zu einer reinen Rechenaufgabe verkommt. Es ist aber gerade der Sinn von Risikomanagementsystemen auch nicht quantifizierbare Risiken zu bewerten, da man über diese wenig weiß und damit die größere Gefahr von ihnen ausgeht.<sup>50</sup>

Wiggert untersuchte in seiner Dissertation<sup>51</sup> deutschsprachige bauwirtschaftliche Risikodefinitionen mit Hilfe des angepassten semantischen Kastens (aSK). Er analysierte die Definitionen des Risikobegriffs zwischen 1971 (Dissertation von Schubert) und 2009 (Dissertation von Riebeling), wobei die Diskussion diesbezüglich in der Bauwirtschaft immer mehr zunahm (siehe Abb. 2-9). Insgesamt wurden 69 Quellen der wissenschaftlichen Literatur und 21 normative Regelwerke auf deren Risikodefinitionen hin durchleuchtet. Dabei wurde pro Autor nur eine Definition zugelassen, mit der Ausnahme von Autorengemeinschaften.<sup>52</sup>

Den größten Einfluss auf die von Wiggert untersuchten Risikodefinitionen übte jene von Link (1999) aus, da fünf nachfolgende Definitionen direkt auf diese zurückgeführt werden können.<sup>53</sup> Diese lautet wie folgt:

<sup>49</sup> Vgl. Hofstadler (2014), Monte-Carlo-Simulation im Baubetrieb – Verteilungsfunktion für Aufwandswerte bei Schalarbeiten, S. 189ff

<sup>50</sup> Vgl. Wiggert (2009), Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen, S. 112

<sup>51</sup> Vgl. Wiggert (2009), Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen, S. 102ff

<sup>52</sup> Vgl. Wiggert (2009), Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen, S. 102ff

„Unter Risiko versteht man die Möglichkeit, daß die durch eine Entscheidung ausgelösten Abläufe nicht notwendigerweise zum angestrebten Ziel führen und es zu negativen oder positiven Zielabweichungen kommt. Risiko läßt sich durch die Bestimmung von Tragweite und Eintrittswahrscheinlichkeit quantifizieren.“<sup>54</sup>

Wiggert untersuchte explizit auch die Chancenintegration in den Risikoauffassungen, wobei er sich nicht auf die bloße Erwähnung der Begrifflichkeit fixierte, sondern das Gesamtkonzept der Risikodefinition beurteilte.<sup>55</sup>

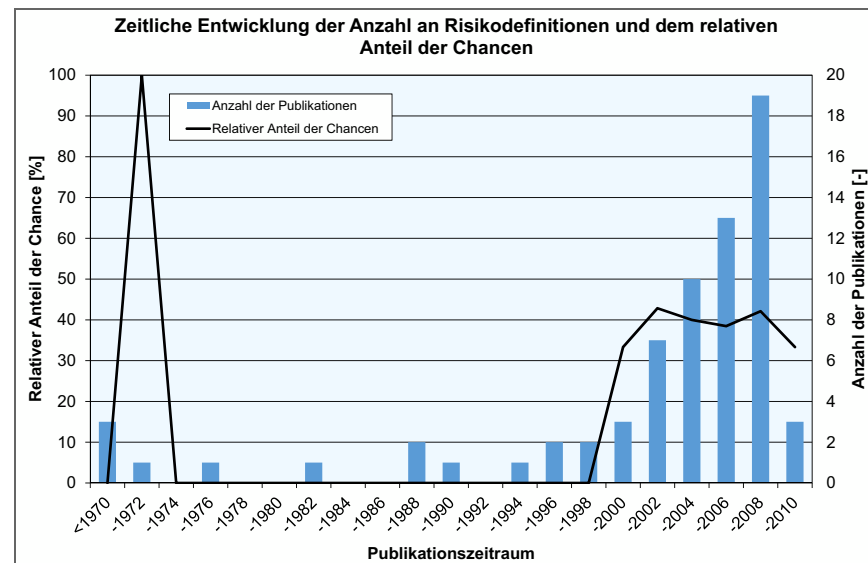


Abb. 2-9 Zeitliche Entwicklung der Anzahl an Risikodefinitionen und dem relativen Anteil der Chancen<sup>56</sup>

Auffällig über den zeitlichen Verlauf der bauwirtschaftlichen/baubetrieblichen Risikodefinitionen ist, dass obwohl bereits Schubert 1971 einen Risikogewinn sah, erst mit der Definition von Link 1999 die „Chance“ wieder im Risikobegriff der Bauwirtschaft auftaucht. Von da an hat sich die Integration des Chancenverständnisses in den Risikodefinitionen etabliert und schwankt um die 40 %, unabhängig von der Anzahl der Definitionen (siehe Abb. 2-9<sup>57</sup>).

Wiggert verglich die chancenorientierte Auffassung von Risiken anhand von Definitionen in der Bauwirtschaft mit jenen von aktuellen Normen aus dem baubetrieblichen Bereich sowie mit Definitionen aus der Allgemeinen Betriebswirtschaftslehre und dem finanzwirtschaftlichen Bereich. Dabei konnte festgestellt werden, dass in den bauwirtschaftlichen Definitionen ca. jede dritte, im finanzwirtschaftlichen Bereich jede fünfte und in der Allgemeinen Betriebswirtschaftslehre nur jede zehnte Definition eine Chance in den Risikobegriff integriert.

Interessant ist außerdem, dass der Anteil chancenorientierter Definitionen in

<sup>53</sup> Vgl. Wiggert (2009). Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen. S. 105

<sup>54</sup> Link (1999). Risikobewertung von Bauprozessen – Modell ROAD – Risk and Opportunity Analysis Device. S. 7

<sup>55</sup> Vgl. Wiggert (2009). Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen. S. 107

<sup>56</sup> Wiggert (2009). Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen. S. 104

<sup>57</sup> Der Abfall der Risikodefinitionen in der letzten Klasse („2009 bis 2010“) in Abb. 2-9 kann damit begründet werden, dass Wiggert seine Dissertation im September 2009 eingereicht hat und damit keine neuen Definitionen mehr in die Untersuchung aufgenommen wurden.

der deutschsprachigen baubetrieblichen Normung mit ca. 60 % höher liegt als dies in der Literatur (ca. 40 %) der Fall ist. Anzumerken ist hierbei jedoch, dass die Grundgesamtheit der Risikodefinitionen in der Normung wesentlich geringer ist als in der wissenschaftlichen Literatur.

Grundsätzlich sind damit zwei Sichtweisen bei der Betrachtung des Begriffs „Risiko“ zu unterscheiden (siehe Abb. 2-10). Es wird dabei immer von positiven oder negativen Abweichungen eines geplanten Solls zu einem vorgefundenen Ist gesprochen. Einerseits bezeichnet ein „Risiko“ lediglich die negativen Abweichungen, wobei die möglichen positiven Abweichungen „Chancen“ genannt werden.

Andererseits wird unter „Risiko“ sowohl die Möglichkeit einer positiven („Chance“) als auch einer negativen Abweichung („Gefahr“) verstanden. Hier impliziert das Risiko sowohl die Gefahr als auch die Chance.<sup>58</sup>

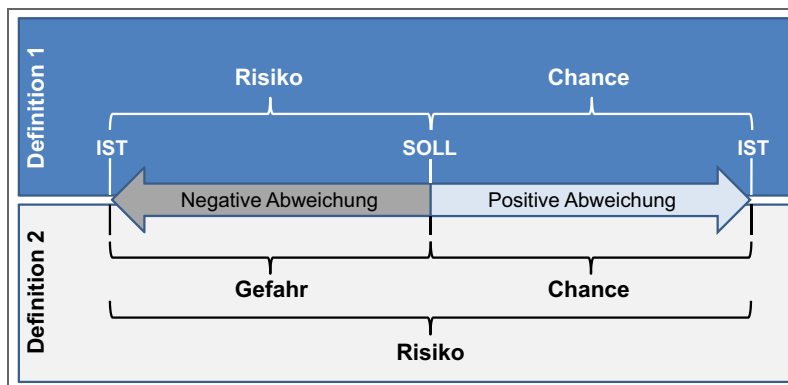


Abb. 2-10 Risikodefinitionen<sup>59</sup>

Auch Stempkowski/Waldauer verwenden den Begriff des Risikos sowohl als Überbegriff, die Chance mitberücksichtigend, als auch als Spezifikation der negativen Auswirkung, wobei dann die Chance separat angeführt wird. Weiters geben sie an, dass der Risikobegriff im allgemeinen Sprachgebrauch als negative Abweichung verwendet wird und es für die Akzeptanz eines Managementsystems daher wenig zweckmäßig ist, künstlich neue Begriffe zu schaffen bzw. zu verwenden.<sup>60</sup>

Im Handwörterbuch der Bauwirtschaft wird unter dem Begriff des Partnerings in Risiken und Chancen als Begriffe auf gleicher Ebene unterschieden:

„[...] Die Partner formen ein Team mit einheitlichen Zielen, erwägen in einem sehr frühen Stadium alle Risiken und Chancen, behandeln und lösen Probleme möglichst sofort und werden oft auch am Projektnutzen beteiligt.“<sup>61</sup>

In einer ExpertInnenbefragung – zwischen Juli und September 2013 von der Technischen Universität Graz durchgeführt<sup>62</sup> – wurde unter anderem auch nachgefragt, wie der Risikobegriff in der Praxis aufgefasst wird. Es wurden

<sup>58</sup> Dies entspricht der Definition von Grimscheid/Motzko (2007). Kalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen. S. 289: „Der Begriff „Risiko“ bedeutet in Bauprojekten die Möglichkeit der Abweichung von konkreten Projektanforderungen in den Bereichen Kosten, Termine und Qualitäten, wobei potenzielle positive Abweichungen „Chance“ und eventuelle negative Abweichungen „Gefahr“ genannt werden.“

<sup>59</sup> Eigene Abbildung in Anlehnung an: Flemming/Netzker/Schöttle (2011). Probabilistische Berücksichtigung von Kosten- und Mengenrisiken in der Angebotskalkulation. S. 95

<sup>60</sup> Vgl. Stempkowski/Waldauer (2013). Risikomanagement Bau – Methoden und Erfahrungen bei der praktischen Umsetzung von Risiko- und Chancenmanagement bei Bauprojekten. S. 27

<sup>61</sup> Oberdorfer/Jodl et al. (2001). Handwörterbuch der Bauwirtschaft. S. 117

<sup>62</sup> Vgl. Alber (2013). Risikomanagement in Bauunternehmen – Eine Analyse von Theorie und Praxis.

insgesamt 61 ausgewählte ExpertInnen kontaktiert, von denen 31 für eine Teilnahme gewonnen werden konnten. Die ExpertInnen wiesen zu ca. 74 % eine Berufserfahrung von über 11 Jahren auf. Bei ca. 42 % der Befragten handelte es sich um GeschäftsführerInnen bzw. NiederlassungsleiterInnen. Die ExpertInnen wurden konkret gefragt, wie gut die folgenden Definitionen für den bauwirtschaftlichen Risikobegriff zutreffen:

- „Risiko“ beinhaltet die Möglichkeit einer positiven Zielabweichung (Chance)
- „Risiko“ beinhaltet die Möglichkeit einer negativen Zielabweichung (Gefahr/Wagnis)
- Definition von Wiggert: „Risiko ist der Einfluss von Unsicherheiten auf die Performance<sup>63</sup>, ausgehend von bewusst oder unbewusst gesetzten Zielen. Eine potentielle Steigerung der relativen Performance wird als Chance und eine potentielle Verminderung als Wagnis bezeichnet.“<sup>64</sup>

Die ExpertInnen konnten je Definition einen Schieberegler frei zwischen 0 % (= trifft nicht zu) und 100 % (= trifft völlig zu) positionieren. Die Ergebnisse wurden in Klassen mit einem Wertebereich von jeweils 20 % zusammengefasst in Abb. 2-11 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Definition von Wiggert sehr kontrovers entweder als sehr gut zutreffend oder als wenig zutreffend beurteilt wurde. Die ExpertInnen geben allerdings sehr klar an, dass Risiko nicht die Möglichkeit einer positiven Zielabweichung (Chance) beinhaltet. Andererseits gibt es eine große Übereinstimmung mit der Aussage, dass Risiko eine Möglichkeit der negativen Zielabweichung beinhaltet.

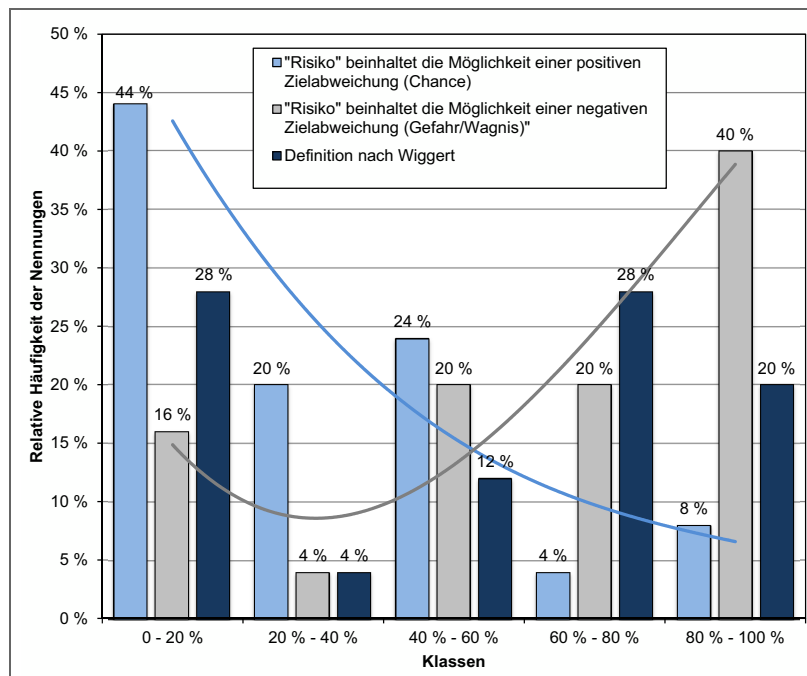


Abb. 2-11 Gefahren-Chancen-Auffassung des Risikobegriffs<sup>65</sup>

<sup>63</sup> Unter Performance wird in diesem Zusammenhang ein Maß der Zielerreichung verstanden.

<sup>64</sup> Wiggert (2009). Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen. S. 114

<sup>65</sup> Vgl. Alber (2013). Risikomanagement in Bauunternehmen – Eine Analyse von Theorie und Praxis. S. 127



Werden die quantitativen Antworten der ExpertInnen jeweils der Möglichkeit einer positiven (Chance) und einer negativen (Gefahr/Wagnis) Zielabweichung zugeordnet, zeigt sich, dass der Begriff „Risiko“ zu 34 % „Chancen“ und zu 66 % „Gefahren/Wagnisse“ enthält.<sup>66</sup>

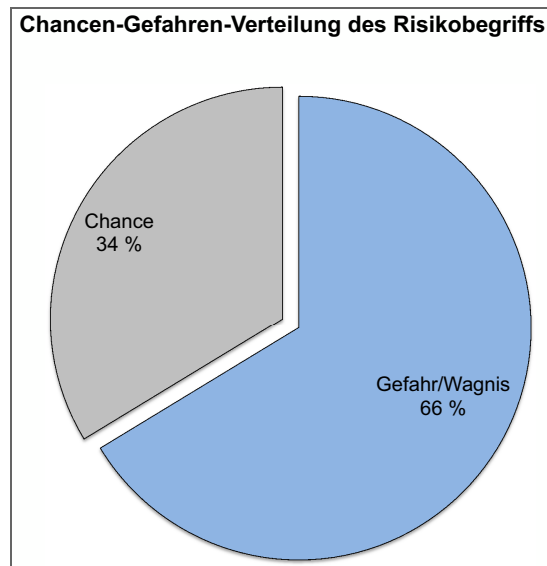


Abb. 2-12 Chancen-Gefahren-Verteilung des Risikobegriffs<sup>67</sup>

Tendenziell ist also eher eine Trennung der beiden Begriffe „Risiko“ und „Chance“ zu bevorzugen, da ein „Risiko“ auch in der Auffassung der Praxis eher mit negativen Auswirkungen behaftet ist.

### 2.3.4 Normung

Ein Vergleich der Begriffsdefinitionen in unterschiedlichen Normenwerken zeigt, dass auch innerhalb dieser keine einheitliche Definition des Risikobegriffs vorherrscht.

In der ÖNORM B 1801-1:2009 wird der Begriff des Risikos wie folgt definiert:

„Unwägbarkeiten und Unsicherheiten bei Planungen, Ermittlungen und Prognosen“<sup>68</sup>

Die ÖNORM ISO 31000:2010 definiert ein Risiko als „Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele“. Diese Definition enthält weiters noch 5 Anmerkungen:

„ANMERKUNG 1 Eine Auswirkung stellt eine Abweichung von Erwartungen dar – in positiver und/oder negativer Hinsicht.

ANMERKUNG 2 Die Ziele können verschiedene Aspekte umfassen (zB Finanzen, Gesundheit und Sicherheit sowie Umwelt) und auf verschiedenen Ebenen gelten (zB strategische, organisationsweite, projekt-, produkt- und prozessbezogene Ziele).

<sup>66</sup> Es wurden dabei die mit Schiebereglern angegebenen Prozentwerte der ExpertInnen für den Gefahren- und Chancenanteil des Risikobegriffs gemittelt und auf eine Summe von 100 % normiert. Eine direkte Herleitung dieser Ergebnisse aus Abb. 2-11 ist nicht möglich.

<sup>67</sup> Vgl. Alber (2013). Risikomanagement in Bauunternehmen – Eine Analyse von Theorie und Praxis. S. 128

<sup>68</sup> ÖNORM B 1801-1:2009 – Bauprojekt- und Objektmanagement – Teil 1: Objektterrichtung. S. 4

ANMERKUNG 3 Risiken werden häufig durch Bezugnahme auf potenzielle Ereignisse (2.17) und Auswirkungen (2.18) oder eine Kombination davon charakterisiert.

ANMERKUNG 4 Risiken werden häufig mittels der Auswirkungen eines Ereignisses (einschließlich von Entwicklungen) in Verbindung mit der Wahrscheinlichkeit (2.19) seines Eintretens beschrieben.

ANMERKUNG 5 Unsicherheit ist der Zustand, der sich aus dem gänzlichen oder teilweisen Fehlen von Informationen, Verständnis oder Wissen über ein Ereignis, seine Auswirkung oder seine Wahrscheinlichkeit ergibt.<sup>69</sup>

Die Definition des Risikobegriffs nach der ONR 49000:2014 wurde bereits unter Abschnitt 2.3.2 angeführt.

In der ÖNORM S 2410:2010 wiederum wird eine klare Trennung zwischen Risiken und Chancen vorgenommen. Unter „Risiko“ wird eine negative Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele und unter „Chance“ eine positive Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele verstanden. Wahrscheinlichkeiten werden dabei entweder ermittelt<sup>70</sup> oder geschätzt.<sup>71</sup>

**2.4 Verwendung des Risikobegriffs in dieser Arbeit**

Der Begriff des Risikos ist keineswegs eindeutig definiert, wie den angeführten Ansätzen und Kommentaren aus der Literatur zu entnehmen ist. Der Begriff wird hier trotzdem gegenüber anderen Begrifflichkeiten abgegrenzt und die Verwendung in der Bauwirtschaft eingeordnet.

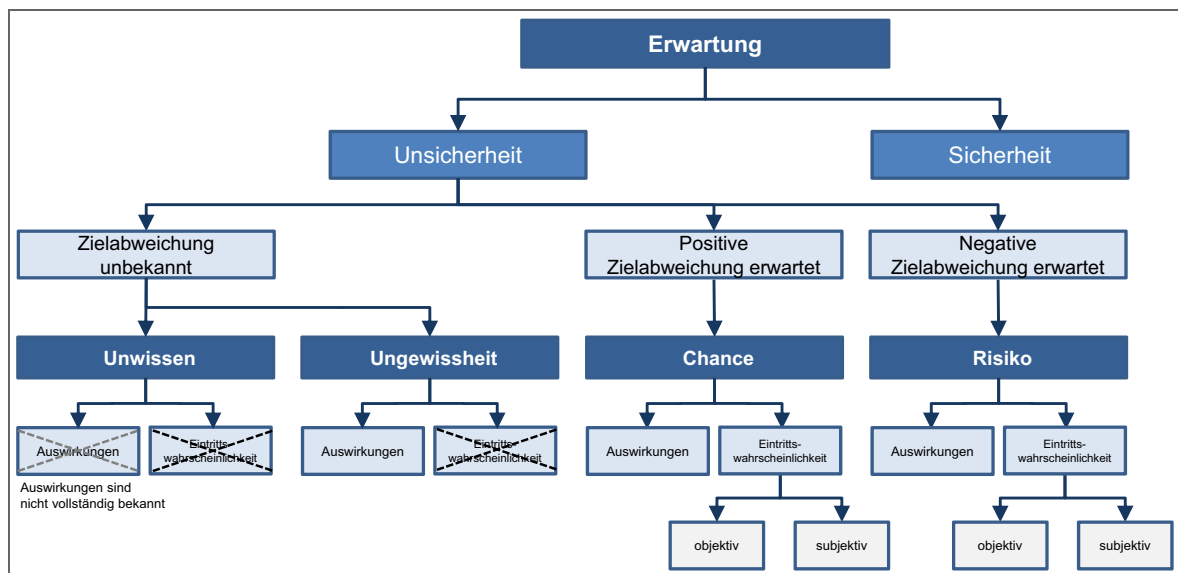


Abb. 2-13 Mögliche Erwartungsstruktur – Messbarkeit der Unsicherheit

<sup>69</sup> ÖNORM ISO 31000:2010 – Risikomanagement – Grundsätze und Richtlinien. S. 6  
<sup>70</sup> objektives, statistisches Verständnis – Erhebung der relativen Häufigkeit zukünftiger Ereignisse oder Entwicklungen – Vgl. ÖNORM S 2410:2010 – Chancen- und Risikomanagement – Analyse und Maßnahmen zur Sicherung der Ziele von Organisationen. S. 10  
<sup>71</sup> ÖNORM S 2410:2010 – Chancen- und Risikomanagement – Analyse und Maßnahmen zur Sicherung der Ziele von Organisationen. S. 5 und 9

In Abb. 2-13 erfolgt eine Differenzierung der möglichen Erwartungsstrukturen in Unsicherheit und Sicherheit. Sicherheit liegt im Allgemeinen nicht vor, da dies einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 100 % entsprechen würde. Bei der Unsicherheit muss in unterschiedliche Haltungen für die erwartete Zielabweichung unterschieden werden. Ist mit negativen Zielabweichungen (Schaden) zu rechnen, spricht man in weiterer Folge von Risiko, wenn sowohl die Auswirkungen als auch die Eintrittswahrscheinlichkeiten objektiv bekannt (wenn eine ausreichend große Datenbasis vorliegt) oder subjektiv aufgrund von Erfahrungen einschätzbar sind. Diese Auffassung widerspricht der Definition von Knight, ist aber angesichts der gegenwärtigen Verwendung des Begriffs Risiko in der Bauwirtschaft und aufgrund der Problematik von wenigen vorhandenen Daten durchaus nachvollziehbar und schlüssig. Umgekehrt wird von Chancen gesprochen, wenn positive Zielabweichungen erwartet werden und die Auswirkungen und Eintrittswahrscheinlichkeiten (objektiv oder subjektiv) ebenfalls bekannt sind. Risiko und Chance stellen damit horizontal gleichwertige Begriffe dar. Sind weder die Auswirkungen (zumindest nicht vollständig) noch die Eintrittswahrscheinlichkeiten (z.B. die möglichen Zielabweichungen – positiv oder negativ) bekannt, liegt Unwissen vor. Von Ungewissheit wird dann gesprochen, wenn sowohl die Zielabweichung als auch die Eintrittswahrscheinlichkeit unbekannt sind, die Auswirkungen aber quantifiziert werden können.

Zusätzlich ist noch die Kategorie der „unbekannten Unbekannten“ zu erwähnen. Es handelt sich dabei um Ereignisse, deren Eintreten sowie die damit verbundenen Auswirkungen nicht vorhergesehen werden können. Solche „schwarzen Schwäne“<sup>72</sup> werden im Zuge dieser Arbeit nicht behandelt.

### Alltagsbeispiel für die Begriffe

Angenommen man fliegt zu einer Konferenz in einem anderen Land und hatte vor dem Abflug nicht mehr die Zeit, sich den aktuellen Wetterbericht der Region anzusehen. Es liegen also keinerlei Hinweise für die Eintrittswahrscheinlichkeit z.B. eines möglichen Regenereignisses vor. Die Auswirkungen sind aber durchaus bekannt (hat man keinen Schirm mit, wird man nass). In diesem Fall würde man unter Ungewissheit handeln. Unwissen würde z.B. bei vielen Europäern bei einem Hurricane vorliegen, da hier die Auswirkungen nicht oder zumindest nicht vollständig bekannt wären, sofern nicht bereits entsprechende Erfahrungen mit einem solchen Ereignis gemacht wurden.

Hat man sich den Wetterbericht angesehen und wurde dabei die Wahrscheinlichkeit für Regen mit 70 % angegeben, hat man sowohl Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeit als auch über die Auswirkungen. Hat man keinen Schirm mit, hat man das Risiko nass zu werden (und dieses Risiko ist mit 70 % recht hoch) und die Chance (mit 30 % eher gering) trockenen Fußes zur Konferenz zu kommen.

### Beispiel für die Begriffe im Tiefbau

Es soll ein Aushub für den Keller eines Gebäudes hergestellt werden. Liegt kein Bodengutachten vor und wurden keine Erkundungen durchgeführt, handelt man in der Regel unter Ungewissheit. Die Eintrittswahrscheinlichkeit,

<sup>72</sup> Extrem unwahrscheinliche Ereignisse werden von Taleb als „schwarze Schwäne“ („black Swans“) bezeichnet. Er spielt auf die Tatsache an, dass allgemein vermutet wurde, dass alle Schwäne weiß wären, bis in Australien auch schwarze Schwäne entdeckt wurden. Vgl. Taleb (2007). The Black Swan – The Impact of the Highly Improbable. S. XVIIff

dass man z.B. auf schweren Fels trifft ist nicht bekannt, die Auswirkungen mit einem erhöhten Aufwand für das Lösen sind aber durchaus bekannt. Würde man im Zuge der Ausgrabungen auf die Überreste einer alten römischen Siedlung treffen, hat man unter Unwissen gehandelt, da weder die Eintrittswahrscheinlichkeit noch die Auswirkungen eines solchen Fundes vollständig bekannt sind.

Liegt ein Bodengutachten vor, in dem die Anteile der Bodenklassen angegeben werden, oder kann auf Erfahrungen bei angrenzenden Bauvorhaben zurückgegriffen werden, sind die Eintrittswahrscheinlichkeit (zumindest subjektiv) und auch die Auswirkungen einer Verschiebung der Anteile zwischen den Bodenklassen bekannt. Aufgrund des Bodengutachtens bzw. der Erfahrungen können die tatsächlichen Verhältnisse eingeschätzt und je nach erwarteter Zielabweichung die entsprechenden Chancen und Risiken beurteilt werden.

## 2.5 Bezugsbasis

Die Erwartung einer positiven oder negativen Zielabweichung hängt wesentlich von der Bezugsbasis ab (siehe Abb. 2-14). Je nachdem ob die Basis beispielsweise für einen Aufwandswert AW [Std/MEH] höher oder niedriger angesetzt wird, desto höher oder niedriger wird die Wahrscheinlichkeit sein, dass der tatsächliche Aufwandswert unter der gesetzten Basis liegen wird.

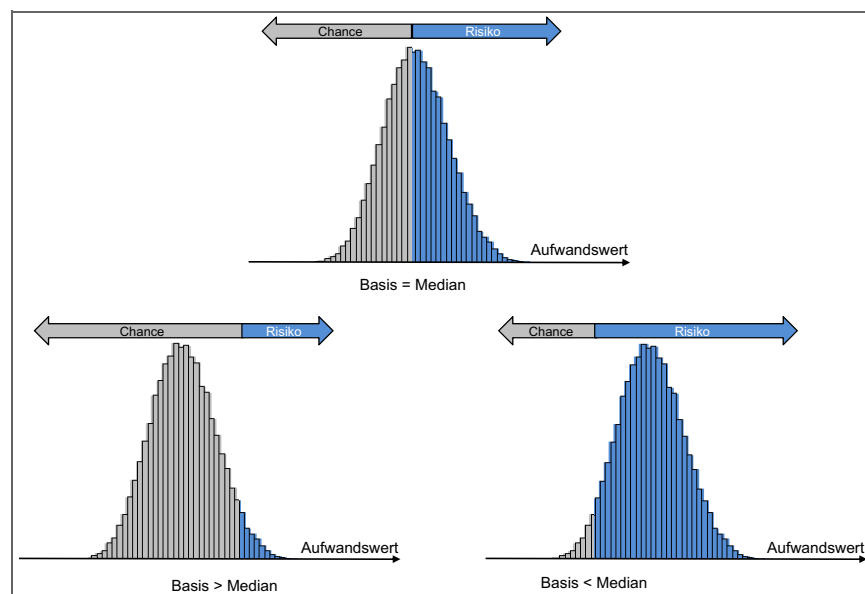


Abb. 2-14 Darstellung von Chancen und Risiken in Abhängigkeit der gewählten Basis<sup>73</sup>

Liegt z.B. ein Histogramm des zu erwartenden Aufwandswerts für die Bewehrungsarbeiten vor, kann der Kalkulation der Median als Basis zugrunde gelegt werden (siehe Abb. 2-14 – oben). Damit ist die Wahrscheinlichkeit

<sup>73</sup> Kummer/Hofstadler (2013), Einsatz der Monte-Carlo-Simulation zur Berechnung von Baukosten. S. 180

einer Unterschreitung sowie einer Überschreitung des gewählten Aufwands werts gleich groß (50 %). Die Möglichkeit, dass ein Risiko in Form eines höheren Aufwands werts schlagend wird, ist gleich groß wie die Chance einen niedrigeren Aufwands wert in der Ausführung zu generieren. Wird die Basis jedoch höher als der Median angenommen (siehe Abb. 2-14 – links unten), verschiebt sich das Verhältnis zwischen Risiko und Chance zugunsten einer positiven Zielabweichung. Die Chance einen niedrigeren Aufwands wert zu erzielen ist bei Weitem größer als das Risiko eines höheren Aufwands werts. Umgekehrt wird das Risiko erhöht, wenn die Basis des Aufwands werts niedriger als der Median angesetzt wird (siehe Abb. 2-14 – rechts unten). Die Chance, dass in der tatsächlichen Ausführung ein niedrigerer Aufwands wert als die ohnedies schon niedrig angesetzte Basis erzielt wird, ist entsprechend gering. In welchem Verhältnis Chancen und Risiken zueinander stehen hängt von der Risikobereitschaft der Unternehmung sowie von strategischen Überlegungen ab. In der Praxis sind die AN den Risiken näher als den Chancen, da sie aufgrund der Konkurrenz die Basis eher niedrig ansetzen müssen.<sup>74</sup>

Das Problem der zu wählenden Basis wurde bereits von Schubert aufgegriffen und anhand eines Beispiels für die Aushubleistungen veranschaulicht.<sup>75</sup>

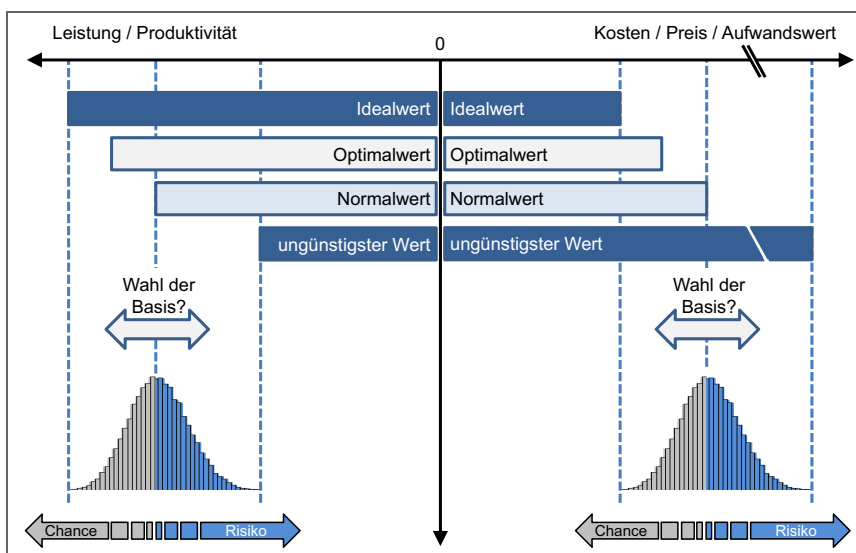


Abb. 2-15 Darstellung von Chancen und Risiken in Abhängigkeit der gewählten Basis umgelegt auf anfallende Kosten<sup>76</sup>

Um dieses Verständnis des Risikos, welches von der jeweiligen Basis abhängt, auch auf andere Kenngrößen auszuweiten, dient Abb. 2-15. Auf der linken Seite sind Kennwerte aufgetragen, die im Idealfall einen „großen“ Zahlenwert aufweisen (wie z.B. die Leistung oder Produktivität). Umgekehrt ist rechts die Situation für jene Kennzahlen dargestellt, die bei „niedrigen“ Zahlenwerten als günstig für den Verlauf eines Projektes erachtet werden.

<sup>74</sup> Vgl. Kummer/Hofstadler (2013). Einsatz der Monte-Carlo-Simulation zur Berechnung von Baukosten. S. 180

<sup>75</sup> Vgl. Schubert (1971). Die Erfäßbarkeit des Risikos der Bauunternehmung bei Angebot und Abwicklung einer Baumaßnahme. S. 10

<sup>76</sup> In Anlehnung an Schubert (1971). Die Erfäßbarkeit des Risikos der Bauunternehmung bei Angebot und Abwicklung einer Baumaßnahme. S. 11

Dies können beispielsweise Kosten, Preise oder Aufwandswerte sein. Je niedriger solche Werte in der Kalkulation angesetzt werden, desto höher ist in der Regel auch das eingegangene Risiko eines Bieters bzw. Auftragnehmers.

Werden nur Idealwerte angesetzt, ist keine Chance mehr vorhanden und das bestmögliche Ergebnis bleibt eine Situation, bei der kein Gewinn und kein Verlust realisiert werden. Dies kann in keinem Fall im Interesse eines Unternehmens liegen, da es völlig dem Ertragsziel widerspricht.

Auch für die Gewährung von Nachlässen oder den Ansatz von Zuschlägen ist es für den AN wesentlich, sein Kostenhistogramm zu kennen. Ein Nachlass von z.B. 10 % wirkt sich je nach Form des Histogramms unterschiedlich auf die Chancen-Risiko-Verteilung aus. Bei Histogrammen mit einer sehr geringen Spannweite kann sich ein zu hoher Nachlass zu einem nicht mehr tragbaren Risiko entwickeln, da die Chance, die Leistung in der Ausführung noch günstiger herstellen zu können, rapide abnimmt. Bei Histogrammen mit geringer Spannweite haben demnach prozentuelle Nachlässe (bezogen auf den Preis) einen höheren Einfluss auf die Chancen-Risiko-Verteilung als dies bei Verteilungen mit großer Spannweite der Fall ist. Ohne die Kenntnis der Verteilung kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob mit einem Nachlass das Risiko noch tragbar ist oder nicht bzw. ob das neue Chancen-Risiko-Verhältnis der Risikopolitik des Unternehmens entspricht.

Wird ein Chancen-Risiko-Verhältnis vorgegeben, kann umgekehrt über eine Rückrechnung der maximal vertretbare Nachlass ermittelt werden. Möchte der AN beispielsweise für sein Angebot maximal eine Standardabweichung vom Mittelwert abrücken, kann der bis zu diesem spezifischen Chancen-Risiko-Verhältnis zulässige Nachlass erhoben werden.

## 2.6 Einordnung verwandter Begriffe

In einem weiteren Schritt werden wichtige und auch oft verwendete Begriffe, die mit Unsicherheiten und dem Thema des Risikomanagements im Zusammenhang stehen, in Bezug zu Risiken und Chancen gesetzt.

In Tab. 2-1 wird zwischen äußeren und inneren Einflüssen (Entscheidungen) unterschieden, da je nach Einflussbereich unterschiedliche Begrifflichkeiten verwendet werden. Bei der Betrachtung der Quelle steht die Frage im Hintergrund, warum ein Risiko eingegangen wird. Es kann eine Gefahr von außen vorliegen oder aber eine Gelegenheit (z.B. bezogen auf den Baugrund kann schwerer Fels oder leicht lösbarer Boden vorgefunden werden). Wird ein Risiko aufgrund einer Entscheidung eingegangen, gibt es entweder ein Wagnis<sup>77</sup> oder eine Möglichkeit als Quelle dieses Risikos bzw. der Chance. Das allgemeine Unternehmerwagnis ist beispielsweise bei jeder gewerblichen Tätigkeit vorhanden. Oft werden Risiken aber eingegangen, weil gleichzeitig auch eine Chance gesehen wird.

Nachdem sich eine Chance bzw. ein Risiko realisiert hat sind damit entsprechende Ergebnisse positiver bzw. negativer Auswirkungen verbunden. Bei den äußeren Einflüssen ist das Ergebnis einer negativen Auswirkung (ein Umstand hat sich realisiert/materialisiert) ein Nachteil und bei einer positiven

<sup>77</sup> Lt. ÖNORM DIN 69905:2001 wird Wagnis als das Handeln unter Hinnahme eines erkannten Risikos definiert.

Auswirkung ein Vorteil. Dies begründet sich dadurch, dass ein äußerer Umstand noch keinen Gewinn oder Verlust verursachen kann. Für den Aushub stellt ein schwerer Fels grundsätzlich einen Nachteil dar, hat der AN einen entsprechenden Preis für eine solche Position abgegeben, lässt sich dennoch ein Gewinn erzielen. Findet man jedoch einen leicht lösbaren Boden vor, stellt dies grundsätzlich einen Vorteil dar, da die Voraussetzungen, um einen Gewinn zu erzielen bzw. die Leistung ordnungsgemäß ohne große Behinderungen erbringen zu können sehr gut sind. Hat man sich aber für einen schlechten Einheitspreis entschieden (innerer Einfluss), besteht trotzdem die Möglichkeit eines Verlustes.

Betrachteter Umstand	Einflüsse von außen	Einflüsse von innen (Entscheidungen)
Quelle des Risikos	Gefahr	Wagnis
Quelle der Chance	Gelegenheit	Möglichkeit
Ergebnis einer negativen Auswirkung	Nachteil	Verlust
Ergebnis einer positiven Auswirkung	Vorteil	Gewinn

Tab. 2-1 Zusammenhang von risikoverwandten Begriffen

## 2.7 Zusammenfassung

Der Risikobegriff ist nicht eindeutig definiert und wird auch in unterschiedlichen Disziplinen abweichend aufgefasst und verwendet. Da eine globale Begriffsdefinition in naher Zukunft nicht absehbar ist, wurde der Risikobegriff und verwandte Begrifflichkeiten für die Bauwirtschaft unter der Gesamtheit der Erwartung eingeordnet und sortiert. Wesentlich ist dabei die Trennung von Risiko und Chance, da auch in der Praxis eher negative Zielabweichungen mit Risiken verbunden werden. Es handelt sich dabei also um horizontal gleichwertige Begriffe. Weiters ist hervorzuheben, dass auch subjektive Wahrscheinlichkeiten die Verwendung des Begriffs Risiko nicht ausschließen sollten. Gerade in der Bauwirtschaft und auch bei baubetrieblichen Betrachtungen muss häufig auf Erfahrungswerte und subjektive Einschätzungen zurückgegriffen werden. Diese Einschätzungen fließen in weiterer Folge in Kalkulationen, Bauzeitermittlungen und Verfahrensentscheidungen ein und werden somit integraler Bestandteil der baubetrieblichen, bauwirtschaftlichen und vertraglichen Abwicklung von Bauprojekten.

Für die vorliegende Arbeit werden die beiden Begriffe Risiko und Chance folgendermaßen definiert:

*Risiko ist eine Erwartungshaltung unter Unsicherheit, bei der mit einer negativen Zielabweichung gerechnet wird und die Auswirkung und Eintrittswahrscheinlichkeit (objektiv oder auch subjektiv) bekannt sind.*

*Chance ist eine Erwartungshaltung unter Unsicherheit, bei der mit einer positiven Zielabweichung gerechnet wird und die Auswirkung und Eintrittswahrscheinlichkeit (objektiv oder auch subjektiv) bekannt sind.*





### 3 Kennzahlen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zu baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Kennzahlen dargestellt und speziell auf den Zusammenhang zwischen Produktivität, Aufwandswert und Leistung eingegangen.

Kennzahlen kommen in der Kalkulation, bei Verfahrensvergleichen sowie bei der Bauablaufplanung und Logistik in unterschiedlichen Betrachtungstiefen (Grob- bis Detailbetrachtung) zum Einsatz. Bezogen auf die Stahlbetonarbeiten dienen Kennzahlen beispielsweise zur Beurteilung und Bewertung der Beton-, Bewehrungs-, Schalungs-, Logistik- und Arbeitsintensität eines Bauwerks oder Bauteils. Je höher der Detaillierungsgrad und der Informationsgehalt zu einem bestimmten Sachverhalt ist, desto aussagekräftiger sind die angegebenen Kennzahlen.<sup>1</sup>

#### 3.1 Allgemeines zu Kennzahlen

Kennzahlen sind Größen, die einen quantitativ messbaren Sachverhalt in konzentrierter Form wiedergeben. Sie stellen damit eine bestimmte Information als quantitativen Wert (Zahl) mit besonderem Aussagegehalt in knapper Form dar.<sup>2</sup>

##### 3.1.1 Kennzahlenarten

Grundsätzlich wird in absolute und relative Kennzahlen unterschieden, wobei Gliederungszahlen, Beziehungszahlen und Messzahlen zur Gruppe der relativen Kennzahlen (Verhältniszahlen) gezählt werden (siehe Abb. 3-1).

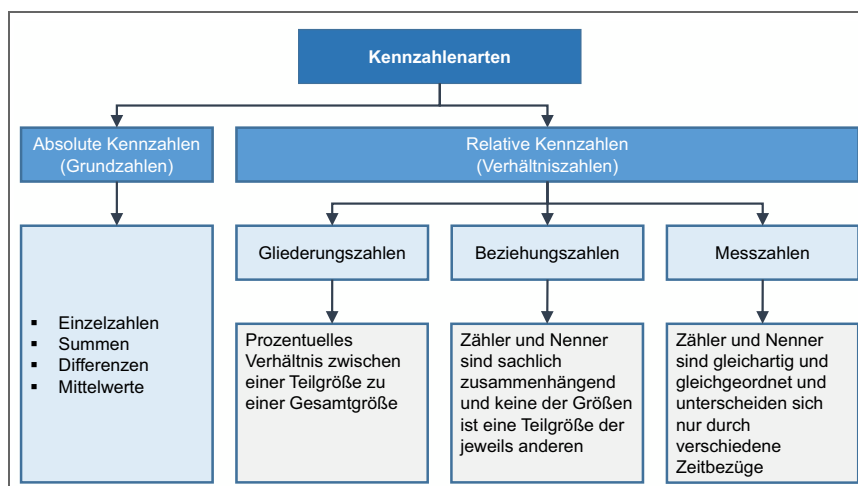


Abb. 3-1 Gliederung von Kennzahlenarten<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Vgl. Hofstadler (2008). Schararbeiten. S. 443

<sup>2</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 106

Gliederungszahlen sind Verhältniszahlen, bei denen eine Teilgröße in Beziehung zu einer Gesamtgröße gesetzt wird.<sup>4</sup> Ein Beispiel für eine Gliederungszahl wäre der Mengenanteil gebogener Bewehrungsstäbe im Verhältnis zur Gesamtbewehrungsmenge.

Beziehungszahlen sind Verhältniszahlen, bei denen Zähler und Nenner sachlich zusammenhängende Größen sind, von denen keine eine Teilgröße der jeweils anderen darstellt.<sup>5</sup>

Als Beispiel für Beziehungszahlen kann der Aufwandswert angeführt werden, der das Verhältnis zwischen Lohnstunden [Std] und Produktionsmenge [MEH] angibt. Der Gesamt-Aufwandswert der Stahlbetonarbeiten wird in der Einheit [Std/m<sup>3</sup>] angegeben. Weitere Beziehungszahlen im Bereich der Stahlbetonarbeiten sind der Ortbeton-, Schalungs- und Bewehrungsgrad sowie Leistungswerte und Produktivitätskennzahlen.<sup>6</sup>

Messzahlen bezeichnen Verhältniszahlen, bei denen Zähler und Nenner gleichartig und gleichgeordnet sind und sich nur durch verschiedene Zeitbezüge unterscheiden. Als Beispiel können Umsatzmesszahlen angeführt werden.<sup>7</sup>

Für baubetriebliche und bauwirtschaftliche Betrachtungen sind die relativen Kennzahlen (Verhältniszahlen) – und hier besonders die Beziehungszahlen – von Interesse. Diese stehen auch im Zentrum dieses Kapitels.

### 3.1.2 Beziehungen zwischen Kennzahlen

Für die Beurteilung wirtschaftlicher Sachverhalte müssen oft mehrere Kennzahlen herangezogen werden. Diese können dann innerhalb eines Kennzahlensystems in unterschiedlicher Beziehung zueinander stehen (siehe Abb. 3-2).<sup>8</sup>

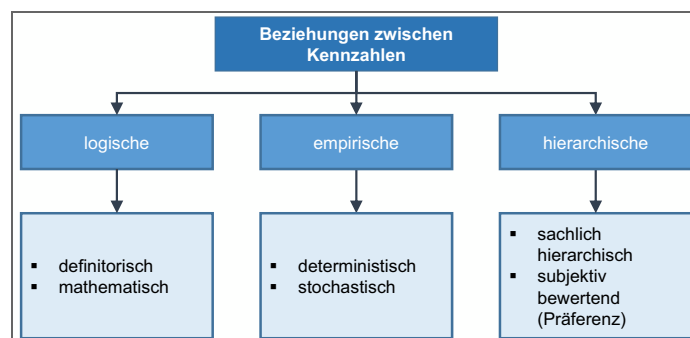


Abb. 3-2 Beziehungen zwischen Kennzahlen<sup>9</sup>

Eine logische Beziehung kann entweder definitorisch (aufgrund begrifflicher Abgrenzung zusammenhängend) oder mathematisch (durch Anwendung mathematischer Regeln und zulässiger mathematischer Umformungen – kein empirischer Aussagegehalt) sein.<sup>10</sup>

<sup>3</sup> In Anlehnung an: Gladen (2014). Performance Measurement – Controlling mit Kennzahlen. S. 14ff

<sup>4</sup> Vgl. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/8084/gliederungszahl-v9.html>. Datum des Zugriffs: 03.06.2015

<sup>5</sup> Vgl. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/6293/beziehungszahl-v9.html>. Datum des Zugriffs: 03.06.2015

<sup>6</sup> Vgl. Hofstadler (2007). Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 106ff

<sup>7</sup> Vgl. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/7736/messzahl-v9.html>. Datum des Zugriffs: 03.06.2015  
Messzahlen bilden die Grundlage zur Bildung von Indexzahlen.

<sup>8</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 107

<sup>9</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 108

Empirische Beziehungen sind durch Gegebenheiten in der Realität begründet. Ökonomische Zusammenhänge beruhen zu großen Teilen auf Entscheidungen von Personen und folgen daher keinen deterministischen Gesetzen. Der stochastische Charakter der Kennzahlen sowie deren Beziehungen sollte daher beachtet werden. Werden deterministische Ansätze verwendet, stellt dies eine Vereinfachung gegenüber der Realität dar.<sup>11</sup>

Hierarchische Beziehungen sind auf eine Rangordnung zwischen den Kennzahlen zurückzuführen. Diese ist entweder durch empirische Sachverhalte oder subjektive Präferenzen begründet. Merkmale für sachlich empirische Rangordnungen können z.B. die zeitliche Reichweite oder die Auswirkungen auf Unternehmensziele sein. Subjektiv bewertende Rangordnungen spielen vor allem bei der Ordnung von Kennzahlen eine Rolle, die zugleich als Zielvorgaben dienen sollen. Die subjektive Wertschätzung des jeweiligen Entscheidungsträgers ist dabei maßgebend.<sup>12</sup>

Kennzahlen im Baubetrieb und der Bauwirtschaft stehen zumeist in einer empirischen Beziehung zueinander. Häufig werden dabei deterministische Zusammenhänge angenommen, obwohl diese zufallsbedingt einen stochastischen Charakter aufweisen. Dies bedeutet einerseits, dass die jeweiligen Kennzahlen selbst gewissen Streuungen unterliegen, andererseits sind die Beziehungen zwischen Kennzahlen auch meist nicht deterministisch sondern von Zufallsprozessen mitbestimmt.

### 3.1.3 Verwendung von Kennzahlen

Die Ermittlung von Kennzahlen ist immer mit einem spezifischen Zweck verbunden. Die Verwendung von Kennzahlen erfolgt dabei entweder zum Zwecke der Steuerung oder der Information (siehe Abb. 3-3). Werden Kennzahlen für ein Zielsystem herangezogen, bilden diese auch gleichzeitig ein Steuerungselement, das zur Planung, Bewertung, Verhaltensbeeinflussung und zur Durchführung von Kontrollen (Soll-Ist-Vergleichen) herangezogen wird.<sup>13</sup>

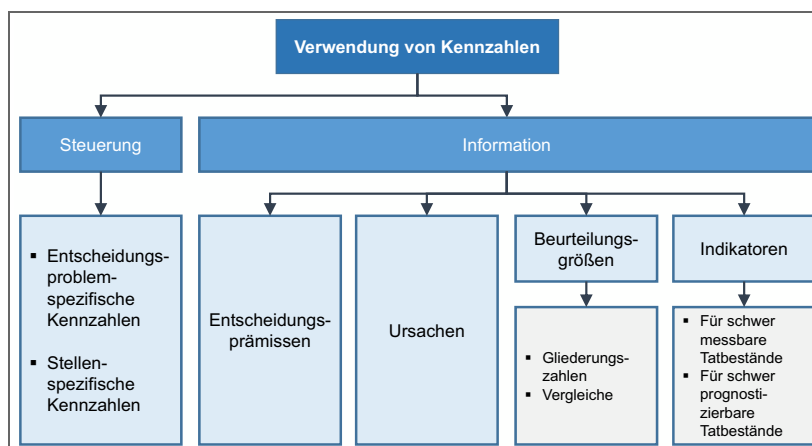


Abb. 3-3 Verwendung von Kennzahlen<sup>14</sup>

<sup>10</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 107f

<sup>11</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 108f

<sup>12</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 109

<sup>13</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 109f

<sup>14</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 110

Werden Kennzahlen im Zuge der Entscheidungsvorbereitung zur Verfügung gestellt, dienen diese einem reinen Informationszweck. Es kommt dabei zu einer Verdichtung im Sinne der benutzeradäquaten Bereitstellung von Informationen.<sup>15</sup>

Sollen Erkenntnisse über Entwicklungen in der Vergangenheit und Zukunft sowie Hinweise auf Zusammenhänge zwischen verschiedenen Größen gewonnen werden, können im Zuge der Beurteilung Gliederungszahlen gebildet oder Vergleiche vorgenommen werden.<sup>16</sup>

Durch die Analyse von Kennzahlen und ihrer Einflussgrößen können Ursachen für bestimmte Sachverhalte ermittelt und die Auswirkungen von Veränderungen anhand von Sensitivitätsanalysen untersucht werden.<sup>17</sup>

Liegen schwer messbare oder schwer prognostizierbare Tatbestände vor und wird ein Zusammenhang zwischen einer Kennzahl und der relevanten Größe erkannt, kann diese Kennzahl als Indikator dienen. Charakteristisch ist dabei, dass kein eindeutiger und sicherer Zusammenhang herrscht, sondern dass lediglich eine Vermutung über die Beziehung besteht. Der Indikator liefert dann ein Anzeichen für die eigentlich interessierende Größe.<sup>18</sup>

### 3.1.4 Erhebung von Kennzahlen

Bei der Erhebung von Kennzahlen kann prinzipiell zwischen dem Zeitpunkt der Erhebung im Bezug auf die Ausführung unterschieden werden. Eine Erhebung ex ante kann durch eine ExpertInnenbefragung zu einem bestimmten Sachverhalt erfolgen, bei dem die ExpertInnen quantitative Angaben zu Kennzahlen machen. Die Erhebung während der Ausführung (inter actio) kann beispielsweise durch Arbeitszeitstudien nach REFA erfolgen. Weiters gibt es noch die Möglichkeit aus sogenannten „historischen Daten“ mit Hilfe statistischer Methoden Kennzahlen ex post zu ermitteln. Bei jeder der Erhebungsmethoden sollten Plausibilitätsprüfungen und theoretische Charakteristika einbezogen werden.<sup>19</sup>

## 3.2 Produktivität

Die Produktivität stellt eine wesentliche Kennzahl im Baubetrieb und der Bauwirtschaft dar und ist ein zentraler Begriff bei der Durchführung von Bauleistungen. Sie dient zur Beurteilung der Ergiebigkeit einzelner Arbeiten oder des gesamten Produktions- bzw. Wirtschaftsprozesses und wird durch das Verhältnis von Output zu Input dargestellt. Neben den elementaren Produktionsfaktoren (Arbeit, Betriebsmittel und Stoffe), wird die Gesamtproduktivität durch dispositive Produktionsfaktoren (Planung, Steuerung, Kontrolle etc.) bestimmt. Wesentlich sind die Wahl und Kombination der Produktionsfaktoren. Diese haben direkten Einfluss auf die Aufwands- sowie Leistungswerte und damit auf die Produktivität. Von ihnen hängt es auch ab, ob die „Normal-Produktivität“<sup>20</sup> erzielt werden kann. Werden die spezifischen

<sup>15</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 110

<sup>16</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 110f

<sup>17</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 111

<sup>18</sup> Vgl. Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 111f

<sup>19</sup> Siehe dazu auch Abschnitt 5.10.

Eine weitere Gliederung zur Entwicklung von Kennzahlensystemen findet sich in Dellmann/Pedell (1994). Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. S. 116ff

Grenzen der Produktionsfaktoren nicht eingehalten, muss ein größerer Ressourceneinsatz die dabei entstehenden Produktivitätsverluste kompensieren. Die Produktionsfaktoren sind gesamtheitlich zu betrachten und nicht einseitig zu optimieren.<sup>21</sup>

Wie wirtschaftlich die Kombination der Produktionsfaktoren gelingt, hängt maßgebend von der Art, Form und Komplexität des Bauwerkes sowie von den Umständen der Leistungserbringung ab (siehe Abb. 3-4). Weiters wird die erzielbare Gesamtproduktivität von den geforderten Qualitäten und Quantitäten, der Bauzeit, dem Umfeld und nicht zuletzt durch die Witterung bestimmt.<sup>22</sup>

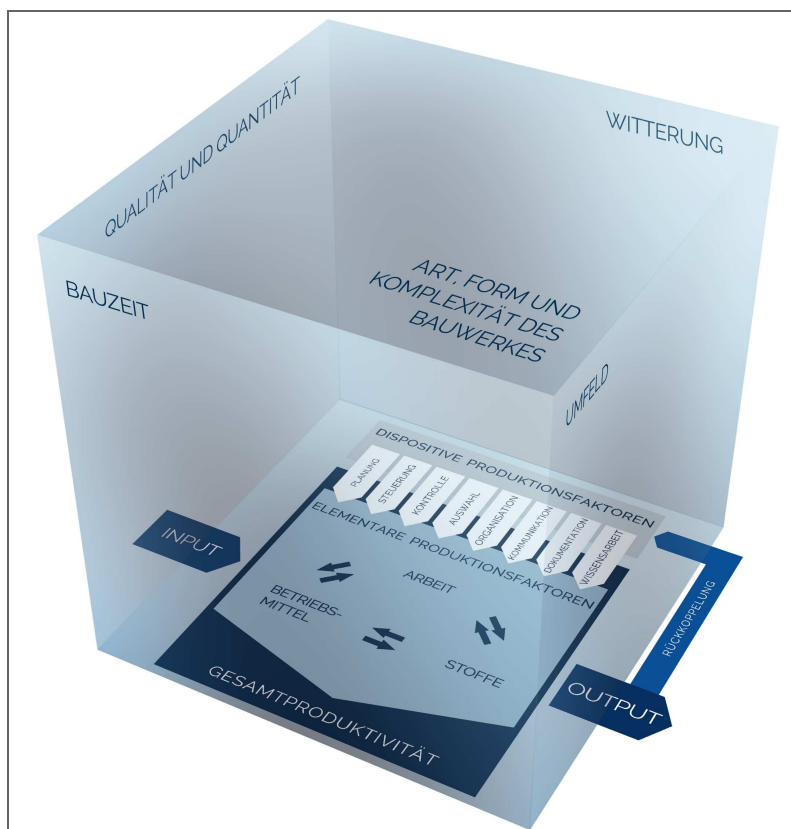


Abb. 3-4 Produktionssystem (Produktivitätswürfel)<sup>23</sup>

Die Produktivität wird durch das einfach anmutende Verhältnis von Output zu Input<sup>24</sup> definiert (siehe Glg. (3-1)), ist jedoch von komplexen Zusammenhängen geprägt.<sup>25</sup>

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \quad (3-1)$$

<sup>20</sup> Unter durchschnittlicher Normal-Produktivität wird die menschliche Produktivität, die von jeder hinreichend geeigneten Arbeitskraft nach genügender Einübung und Einarbeitung ohne Gesundheitsschädigung auf die Dauer im Durchschnitt mindestens erreicht und erwartet werden kann, wenn sie die in der Vorgabe berücksichtigten Zeiten für persönliche Bedürfnisse und ggf. auch für die Erholung einhält. Anmerkung: in Anlehnung an die REFA Definition für Normalleistung. Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 67

<sup>21</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 13ff

<sup>22</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2015). Risiken und Chancen der Mischpreiskalkulation. S. 52f

<sup>23</sup> Hofstadler/Kummer (2015). Risiken und Chancen der Mischpreiskalkulation. S. 52

<sup>24</sup> In der englischen Literatur wird dieses Verhältnis oft umgedreht (Produktivität = Input / Output). Bei der Interpretation und Analyse entsprechender Angaben ist die Verwendung des Begriffs vorab zu prüfen.

<sup>25</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 9

Meist wird nicht die Gesamtproduktivität eines Unternehmens erfasst, sondern Teilproduktivitäten, welche sich auf einzelne Produktionsfaktoren wie z.B. Lohnstunden, Gerätestunden, Materialeinheiten (wie m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup>, t usw.) beziehen.<sup>26</sup>

Teilproduktivitäten können beispielsweise sein:

$$\text{Arbeitsproduktivität} = \frac{\text{Geschalte Fläche in m}^2}{\text{Arbeitsstunden}} \quad (3-2)$$

$$\text{Betriebsmittelproduktivität} = \frac{\text{Baugrubenaushub in m}^3}{\text{Gerätestunden}} \quad (3-3)$$

Zur Veranschaulichung des allgemeinen Verhältnisses zwischen Output und Input sowie deren Auswirkung auf die Produktivität dient Abb. 3-5. Auf der Ordinate ist die Produktivität in [%] und auf der Abszisse der Input bzw. der Output in [%] aufgetragen. Bei einer Produktivität von 100 % ist die Produktivitätsgrenze erreicht. Wird eine Produktivität unter dieser Grenze (< 100 %) erzielt, liegen Produktivitätsverluste vor. Beträgt die Produktivität über 100 %, ist ein Produktivitätsgewinn zu verzeichnen.

Die Kurve mit der Bezeichnung: „Produktivität bei konstantem Output (= 100 %)“ beschreibt jene Fälle, bei denen der Output als konstante Größe (= 100 %) angenommen wird.<sup>27</sup> Der Input wird variiert und die entsprechende Produktivität anhand von Glg. (3-1) ermittelt. Beträgt der Input beispielsweise 150 %, ergibt sich die Produktivität – unter Annahme eines konstanten Outputs von 100 % – mit 66,66 %:

$$\text{Produktivität} = \frac{100 \%}{150 \%} \cdot 100 \% = 66,66 \%$$

Bezogen auf die Produktivitätsgrenze beschreibt dieser Fall einen Produktivitätsverlust von 33,33 % (= 100 % - 66,66 %), da für einen unveränderten Output ein größerer Input erforderlich ist. Kann umgekehrt mit einem geringeren Input (< 100 %) der angestrebte Output erzielt werden, ergibt sich ein Produktivitätsgewinn.

Für die Kurve mit der Bezeichnung: „Produktivität bei konstantem Output (= 100 %)“ ergibt sich ein Produktivitätsverlust, wenn ein zu hoher Input für den zu erzielenden Output eingesetzt werden muss.

Wird der Input konstant bei 100 % gehalten und der zu erzielende Output angepasst (Kurve mit der Bezeichnung: „Produktivität bei konstantem Input (= 100 %)“), ergibt sich ein linearer Verlauf der Produktivität.<sup>28</sup> Beträgt der Output lediglich 60 % bei vollem Input (= 100 %), errechnet sich die Produktivität mit 60 %:

$$\text{Produktivität} = \frac{60 \%}{100 \%} \cdot 100 \% = 60 \%$$

Der Produktivitätsverlust beträgt in diesem Fall 40 % (= 100 % - 60 %). Kann jedoch mit unverändertem Input (= 100 %) ein höherer Output (> 100 %) erreicht werden, kommt es zu Produktivitätsgewinnen.

<sup>26</sup> Vgl. Thommen/Achleitner (2012). Allgemeine Betriebswirtschaftslehre – Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht. S. 115

<sup>27</sup> Ein ähnlicher Ansatz wird auch mit dem ökonomischen Minimalprinzip, bei dem mit möglichst geringem Input ein gegebenes festes Ziel (Output) erreicht werden soll, verfolgt.

<sup>28</sup> Ein ähnlicher Ansatz wird auch mit dem ökonomischen Maximalprinzip, bei dem mit einem gegebenen festen Mittelsatz (Input) ein möglichst hoher Output erzielt werden soll, verfolgt.

Für die Kurve mit der Bezeichnung: „Produktivität bei konstantem Input (= 100 %)“ ergibt sich ein Produktivitätsverlust, wenn bei konstantem Input ein zu geringer Output erzielt wird.

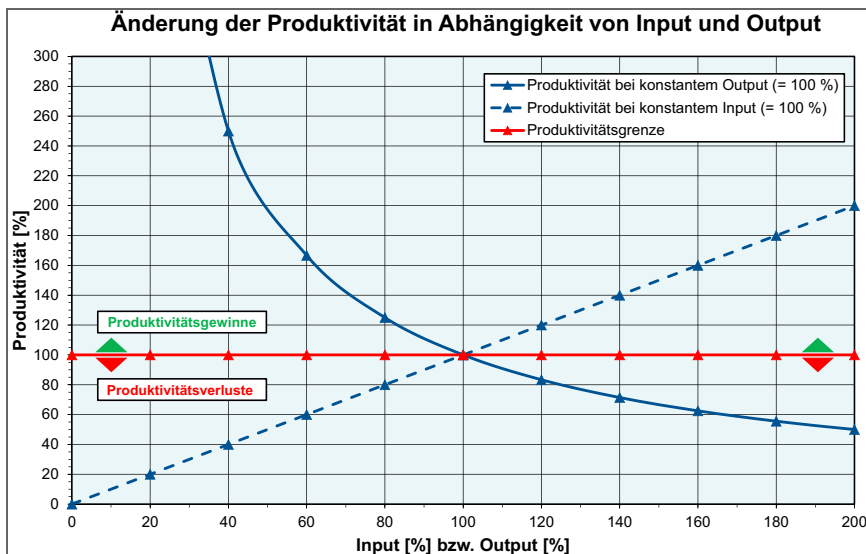


Abb. 3-5 Änderung der Produktivität in Abhängigkeit von Input und Output

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich hauptsächlich auf die Arbeitsproduktivität, da es sich bei den Stahlbetonarbeiten um besonders arbeits- und lohnintensive Tätigkeiten handelt. Für weiterführende Ausführungen zum Thema der Produktivität im Baubetrieb wird auf Hofstadler<sup>29</sup> verwiesen.

### 3.2.1 Produktivitätsverluste

Anhand von dispositiven Vorgaben werden auf den Baustellen die elementaren Produktionsfaktoren (Arbeit, Betriebsmittel und Stoffe) miteinander kombiniert. Für die Erreichung der Normal-Produktivität ist eine optimale Abstimmung der Produktionsfaktoren erforderlich. Müssen allerdings Forcierungsmaßnahmen vorgenommen werden, oder entsprechen die Randbedingungen nicht den Voraussetzungen für einen normalen Einsatz der Produktionsfaktoren, kommt es unweigerlich zu Produktivitätsverlusten. Diese haben über nachstehenden Zusammenhang direkte Auswirkungen auf die Aufwandswerte:

$$\Delta AW_{ERH} = \frac{\Delta PV}{100\% - \Delta PV} \cdot 100\% \quad (3-4)$$

Ein Produktivitätsverlust  $\Delta PV$  [%] kann direkt in die prozentuelle Aufwandswertenerhöhung  $\Delta AW_{ERH}$  [%] übergeführt werden. Umgekehrt lässt sich auch eine Aufwandswertenerhöhung in einen prozentuellen Produktivitätsverlust überführen (siehe Glg. (3-5)).

$$\Delta PV = \frac{\Delta AW_{ERH}}{100\% + \Delta AW_{ERH}} \cdot 100\% \quad (3-5)$$

<sup>29</sup> Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb.

Der Zusammenhang zwischen Aufwandswerterhöhung und Produktivitätsverlust kann auch grafisch in Form eines Diagramms (siehe Abb. 3-6) dargestellt werden. Eine Aufwandswerterhöhung um 50,00 % entspricht damit einem Produktivitätsverlust von 33,33 %.<sup>30</sup>

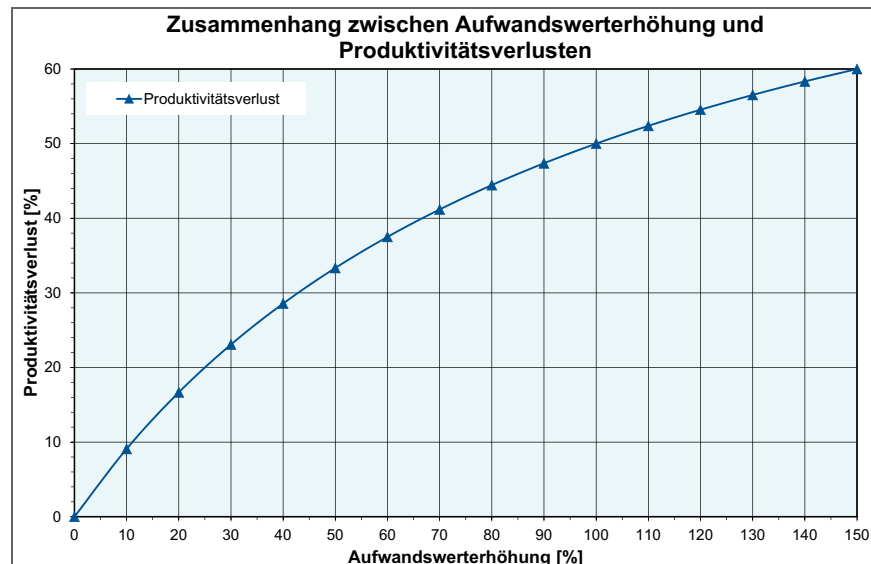


Abb. 3-6 Zusammenhang zwischen Aufwandswerterhöhung [%] und Produktivitätsverlust [%]<sup>31</sup>

### 3.2.2 Modellierung von Produktivitätsverlusten

Auswirkungen von Produktivitätsverlusten anhand von abgeschlossenen Projekten für unterschiedliche Einzelfaktoren innerhalb eines gewissen Bereichs zu erheben, gestaltet sich als äußerst schwierig, da gegenseitige Einflüsse und andere behindernde Umstände nicht ohne Weiteres ausgeschlossen werden können. Aufgrund dieser Tatsachen erscheint es zweckmäßig, die zu erwartenden Produktivitätsverluste bzw. Aufwandswerterhöhungen direkt von ExpertInnen für einzelne Faktoren abschätzen zu lassen. Eine solche ExpertInnenbefragung wurde 2013 am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz durchgeführt. Dabei konnten neben Grenzgrößen, ab deren Über- bzw. Unterschreitung es zu Produktivitätsverlusten kommt, auch mit Hilfe der M-Schätzer-Methode nach Huber, Kurvenverläufe für Aufwandswerterhöhungen bzw. Produktivitätsverluste für nachstehende Einzelfaktoren ermittelt werden:<sup>32</sup>

- Produktivitätsverluste bei Schalarbeiten:
  - Veränderung der Mannschaftsstärke
  - Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche – Flachdecken
  - Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche – Unterzugdecken
  - Unterschreitung der Mindestarbeitslänge
  - Krankapazität
  - Temperatur

<sup>30</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 35ff

<sup>31</sup> Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. S. 59

<sup>32</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb.



- Tägliche Arbeitszeit
  - Veränderung der Lichtverhältnisse
  - Unterstellungshöhe bei Decken
  - Einfluss der Form der Deckengrundrisse
  - Einarbeitungseffekt
- Produktivitätsverluste bei Bewehrungsarbeiten:
    - Veränderung der Mannschaftsstärke
    - Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche – Bodenplatten
    - Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche – Flachdecken
    - Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche – Unterzugdecken
    - Unterschreitung der Mindestarbeitslänge
    - Krankkapazität
    - Temperatur
    - Tägliche Arbeitszeit
    - Veränderung der Lichtverhältnisse
- Produktivitätsverluste bei Betonierarbeiten:
    - Veränderung der Mannschaftsstärke
    - Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche – Bodenplatten
    - Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche – Flachdecken
    - Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche – Unterzugdecken
    - Unterschreitung der Mindestarbeitslänge
    - Temperatur
    - Tägliche Arbeitszeit
    - Veränderung der Lichtverhältnisse
- Produktivitätsverluste bei Stahlbetonarbeiten:
    - Veränderung der Mannschaftsstärke
    - Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche
    - Unterschreitung der Mindestarbeitslänge
    - Krankkapazität
    - Temperatur
    - Tägliche Arbeitszeit
    - Veränderung der Lichtverhältnisse
    - Bauzeit – Verlängerung
    - Bauzeit – Verkürzung

Die aus dieser Studie ermittelten Kurvenverläufe für Stahlbetonarbeiten werden in weiterer Folge für die Berechnungen und Simulationen in dieser Arbeit herangezogen und in die gezeigten Modelle integriert.

Einflussfaktoren auf die Teilproduktivitäten		
		
Arbeit	Betriebsmittel	Stoffe
<b>Einsatzbedingungen</b>	<b>Einsatzbedingungen</b>	<b>Transportierfähigkeit</b>
Lage des Bauvorhabens	Höhe	Kleinteiligkeit
Größe und Komplexität des Bauwerks	Eingeschränkter Wirkungsbereich (z.B. Schwenkradius)	Fragilität
Veränderung im Komplexitätsgrad	Temperatur	Temperaturverhalten
Arbeitszeitmodell	Mindestarbeitsfläche	Homogenität
Tägliche Arbeitszeit	Mindestarbeitslänge	Steifigkeit
Mindestarbeitsfläche	Mindestarbeitshöhe	<b>Lagerfähigkeit</b>
Mindestarbeitslänge	Quantitative Gerätegruppengröße	Haltbarkeit
Mindestarbeitshöhe	Qualitative Gerätegruppengröße	Kleinteiligkeit
Lichtverhältnisse	Sauerstoffgehalt	Temperaturverhalten
Quantitative Gruppengröße	<b>Bedienung</b>	Feuchtigkeitsempfindlichkeit
Qualitative Gruppenzusammensetzung	Spielzeit	<b>Verarbeitbarkeit</b>
Staub, Geruch, Lärm	Qualifikation des Geräteführers	Bearbeitbarkeit
Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK)	Motivation des Geräteführers	Härte
Arbeitssicherheit	<b>Betriebsmittelspezifische Einflüsse</b>	Steifigkeit
Persönliche Schutzausrüstung	Gewicht und Größe	Homogenität
<b>Spezifische Einflüsse der Arbeitskräfte</b>	Leistungsvermögen	Konsistenz
Erfahrung/Ausbildung/Qualifikation	Wartungsintensität	Trennbarkeit
Motivation/Moral	Reparaturanfälligkeit	Porigkeit
Teamgeist	Haltbarkeit	Ebenheit
Über- oder Unterforderung der Arbeitskräfte	Verbrauch	Haftfähigkeit
Kommunikationsprobleme	Abgase	Wärmeleitfähigkeit
Über- oder Unterversorgung an Informationen	Lärm	Temperaturverhalten
Einarbeitungseffekt		Montierbarkeit
Arbeitsausfälle		Ausziehfestigkeit
<b>Ablaufbedingte Einflüsse</b>		Austrocknungszeit und -verhalten
Organisation		Festigkeitsentwicklung
Unsystematischer Bauablauf		Ausschalfrist
Gestörter Fertigungsrythmus		Feuchtigkeitsentwicklung
Interne Arbeitsanweisungen		Reaktionszeit und -verhalten
Einsatzortwechsel		Dauerhaftigkeit
<b>Logistische Einflüsse</b>		Austauschbarkeit
Baustelleneinrichtung		Rückbaubarkeit
Über- oder Unterversorgung mit Gerät		
Fehlende Krankkapazität		
Über- oder Unterversorgung mit Material		
<b>Externe Einflüsse</b>		
Witterung		
Temperatur		
Externe Arbeitsanweisungen		
Planvorlauf und -qualität		
Änderungshäufigkeit in den Plänen		
Leistungsänderungen		

Tab. 3-1 Einflüsse auf die Teilproduktivitäten getrennt nach elementaren Produktionsfaktoren<sup>33</sup>

<sup>33</sup> Vgl. Hofstadler (2015). Nachträge und Leistungsstörungen – Rechtliche und wirtschaftliche Aspekte – Teil 1: Leistungsstörungen und Folgen für Produktivität sowie Kosten. Folie 79

In der vorliegenden Arbeit steht die Systematik für die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Baukosten- und Bauzeitermittlung im Zentrum der Betrachtungen. Werden andere Kurvenverläufe für einzelne Produktivitätsverluste vermutet, können die entsprechenden Gleichungen in das Modell integriert werden.

Erst durch die Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten können Nichtlinearitäten in die Berechnungsmodelle aufgenommen werden.

Weitere Einflüsse auf die elementaren Produktionsfaktoren bzw. Umstände, die zu Produktivitätsverlusten führen können, sind in Tab. 3-1 demonstrativ aufgelistet. Eine exakte Abgrenzung ist schwierig, da sich bestimmte Einflüsse auf mehrere Teilproduktivitäten auswirken können.

### 3.3 Aufwandswerte

Aufwandswerte  $AW_{a,v,i}$  [Std/MEH] stellen eine zentrale Kennzahl für die Kalkulation und die Bauablaufplanung von arbeitsintensiven Tätigkeiten im Baubetrieb und der Bauwirtschaft sowie generell für die Berechnung der Lohnkosten dar. Aus der Multiplikation der Ausführungsmenge, des Aufwandswerts sowie des Mittellohns ergeben sich die Lohnkosten. Aufwandswerte werden durch den Quotient aus Lohnstundensumme  $\Sigma L_{a,v,i}$  [Std] und Produktionsmenge  $M_{a,v,i}$  [MEH] gebildet (siehe Glg. (3-6)).<sup>34</sup>

$$AW_{a,v,i} = \frac{\Sigma L_{a,v,i}}{M_{a,v,i}} \quad (3-6)$$

„Die Größenordnung der Aufwandswerte beeinflusst die Arbeitsproduktivität und damit maßgeblich die Leistung für die einzelnen Ablaufabschnitte. Beeinflusst wird die Arbeitsproduktivität von der erzielbaren Normalleistung der Arbeitskräfte für die betrachteten Arbeiten. Bezieht man den Begriff Normalleistung auf Aufwandswerte, kann in diesem Zusammenhang von einem „Normalaufwandswert“ gesprochen werden.

[...] Aufwandswerte stellen in der Angebotsphase eine wesentliche Grundlage zur Kosten- und Zeitberechnung dar. In der Phase der Arbeitsvorbereitung sind sie wichtiger Bestandteil für die Berechnung der Dauer der einzelnen Vorgänge und damit in weiterer Folge des gesamten Fertigungsablaufs und des Ressourceneinsatzes. Im Zuge z.B. der Nachkalkulation oder des Baustellen-Controllings werden Daten aus der Bauausführung systematisch aufgezeichnet. Wenn die Gesamtstunden und spezifische Produktionsmengen für eine Leistung erfasst sind, berechnet sich der Aufwandswert für eine Tätigkeit (oder für einen Vorgang etc.) nach Glg. (3-6).“<sup>35</sup>

Der Zeitbedarf für eine Arbeitsaufgabe ist von einer Vielzahl an Einflüssen (z.B. unterschiedliches Leistungsangebot der Arbeitskräfte, Art und Zustand der eingesetzten Betriebsmittel, verwendete Baustoffe, Arbeitsplatzbedingungen, Güte der Organisation) geprägt. Die Intensität dieser Einflüsse kann sich verändern und es können auch gegenseitige Beeinflussungen auftreten.

<sup>34</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 46f  
Vgl. Hofstadler/Franzl (2011). Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 129  
(a...Ablaufstufe, v...Vorgang, i...Bauteil)

<sup>35</sup> Hofstadler/Franzl (2011). Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 129

Die Folge ist, dass der Zeitbedarf einer Arbeit – auch bei gleichbleibenden Arbeitsbedingungen – von Ausführung zu Ausführung verschieden ist.<sup>36</sup>

Für die Ermittlung von Aufwandswerten können Multimomentaufnahmen nach der REFA-Methodenlehre durchgeführt werden.

### 3.3.1 REFA-Methodenlehre

Die REFA-Methodenlehre basiert auf dem Systemdenken. Als System wird dabei eine Gesamtheit von Elementen, deren Beziehungen einem bestimmten Zweck dienen, definiert. Je nach Betrachtungstiefe kann ein einzelner Arbeitsplatz, ein ganzes Unternehmen, ein Wirtschaftszweig oder eine gesamte Volkswirtschaft als System bezeichnet werden. Für den Bereich der Wirtschaft wird jeweils nach den beteiligten Systemelementen in

- technische Systeme (Maschinen-Systeme),
- soziale Systeme (Systeme von Menschen) und
- sozio-technische Systeme (Mensch-Maschine-Systeme) unterschieden.<sup>37</sup>

Bei Bauaufgaben sind zumeist sozio-technische Systeme (Arbeitssysteme) anzutreffen. Dabei bildet ein Arbeitssystem den Zweck einer Arbeitsaufgabenerfüllung. Die Eingabe besteht aus Arbeitsgegenständen, Informationen aber auch Energie. Mensch und Betriebsmittel sind die Kapazitäten des Arbeitssystems, die entsprechend der Arbeitsaufgabe die Eingabe in die Ausgabe verändern. Umwelteinflüsse (unterteilt in physikalische, organisatorische und soziale Einflüsse) wirken von außen auf das Arbeitssystem ein oder werden von diesem erzeugt. Das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten ist in Abb. 3-7 schematisch dargestellt (siehe auch Abb. 3-4 – Seite 43 – als Erweiterung von Abb. 3-3 – bezogen auf die Produktivität).<sup>38</sup>

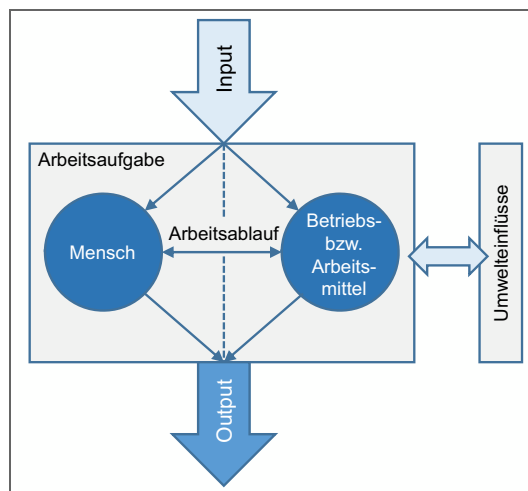


Abb. 3-7 Darstellung eines Arbeitssystems<sup>39</sup>

<sup>36</sup> Vgl. Spranz (1975). Arbeitszeiten im Baubetrieb – Ermittlung und Anwendung bei Kalkulation, Arbeitsvorbereitung und Leistungsentlohnung, S. 5

<sup>37</sup> Vgl. Berg (1984). REFA in der Baupraxis – Teil 1 Grundlagen, S. 51

<sup>38</sup> Vgl. Berg (1984). REFA in der Baupraxis – Teil 1 Grundlagen, S. 52f

<sup>39</sup> Vgl. Berg (1984). REFA in der Baupraxis – Teil 1 Grundlagen, S. 52

Die Beschreibung des Arbeitsablaufs ist das Kernstück jeder Arbeitsstudie und erfasst

- wo (in welcher Abteilung, auf welcher Baustelle, in welcher räumlichen Abfolge),
- wann (in welcher zeitlichen Abfolge),
- wie (mit welchem Arbeitsverfahren und welcher Arbeitsmethode) und
- womit (mit welchen Menschen und Betriebsmitteln) die Eingabe gemäß der Arbeitsaufgabe verändert wird.<sup>40</sup>

Weiters wird der Arbeitsablauf in Ablaufabschnitte unterschiedlicher Größe zerlegt. Man unterscheidet in Makro- und Mikro-Ablaufabschnitte die sich wiederum entsprechend Abb. 3-8 aufliedern lassen.<sup>41</sup>

Die Stahlbetonarbeiten für ein Projekt sind der Ebene des Teilablaufs zuzuordnen. Das Schalen, Bewehren und Betonieren für bestimmte Bauteilgruppen wären als Vorgänge an der Grenze zwischen Makro- und Mikro-Ablaufabschnitten aufzufassen.

Die angeführten Gliederungsmöglichkeiten der Ablaufabschnitte beziehen sich auf das Arbeitssystem. Weiterführend wird auf die Ablaufarten beim Menschen näher eingegangen, um in weiterer Folge die Ermittlung von Aufwandswerten beschreiben zu können.

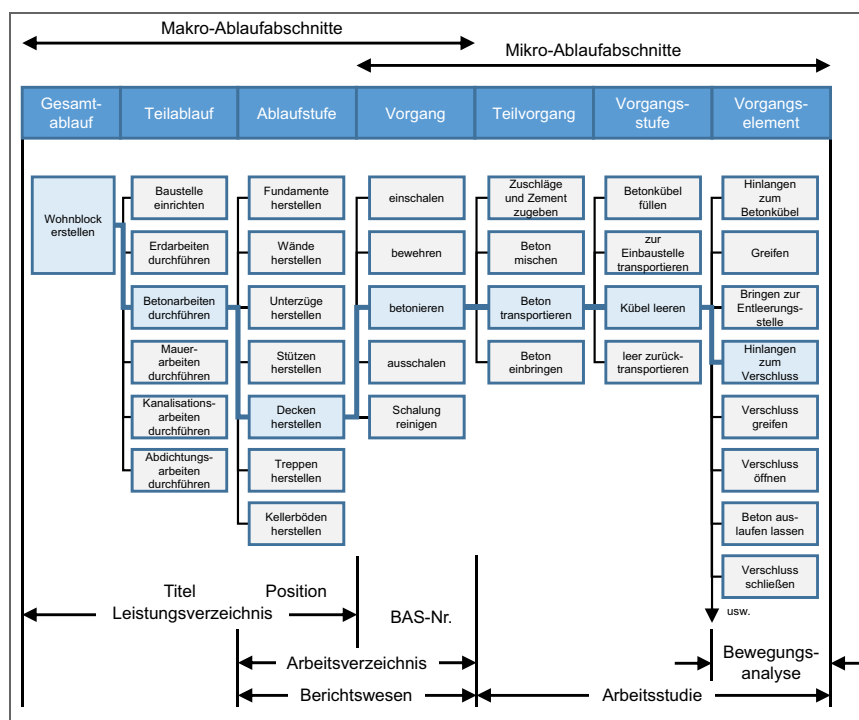


Abb. 3-8 Gliederung des Gesamtablaufs<sup>42</sup>

<sup>40</sup> Vgl. Berg (1984). REFA in der Baupraxis – Teil 1 Grundlagen. S. 57

<sup>41</sup> Vgl. Berg (1984). REFA in der Baupraxis – Teil 1 Grundlagen. S. 57f

<sup>42</sup> Vgl. Berg (1984). REFA in der Baupraxis – Teil 1 Grundlagen. S. 63

### 3.3.2 Ablaufarten des Menschen

Die Gliederung der Ablaufarten des Menschen umfasst alle Ereignisse die auftreten können, solange dieser im Rahmen eines Arbeits- oder Dienstverhältnisses und der Arbeitszeitordnung dem Betrieb zur Verfügung steht.<sup>43</sup>

Nach REFA wird bei der Zeit, die der Mensch im Einsatz ist, in „Tätigkeit“ und „Unterbrechen der Tätigkeit“ unterschieden. Die weitere Unterteilung erfolgt nach Ablaufarten:<sup>44</sup>

#### Haupttätigkeit MH

Dies ist eine planmäßige, unmittelbar der Erfüllung der Arbeitsaufgabe dienende Tätigkeit (z.B. Bewehrung flechten).

#### Nebentätigkeit MN

Ist eine planmäßige, aber nur mittelbar der Erfüllung dienende Tätigkeit (z.B. Bewehrung händisch zur Einbaustelle transportieren).

#### Zusätzliche Tätigkeiten MZ

Sind nicht vorausbestimmte Tätigkeiten, die jedoch erforderlich sind, um die Arbeitsaufgabe zu erfüllen (z.B. Nacharbeiten bereits verlegter Bewehrung).

#### Ablaufbedingte Unterbrechungen MA

Ist ein planmäßiges unvermeidliches Warten des Menschen auf das Ende von Ablaufabschnitten, die beim Betriebsmittel oder Arbeitsgegenstand selbständig ablaufen. Bei Gruppenarbeiten kann dies auch das planmäßige Warten auf einen/eine Arbeitskollegen/-kollegin sein.

#### Störungsbedingte Unterbrechungen MS

Beschreibt organisatorisch oder technisch bedingte Wartezeiten, sowie fehlende Informationen zur Erstellung des Arbeitsauftrags (z.B. Ausfall von Strom oder Klärung fehlender Maßangaben).

#### Erholungsbedingte Unterbrechungen ME

Sind Unterbrechungen, um die infolge der Tätigkeit aufgetretene Arbeitsermüdung abzubauen.

#### Persönlich bedingte Unterbrechungen MP

Liegen vor, wenn ein Mensch aus persönlichen Gründen seine Tätigkeit unterbrechen muss (z.B. Gang zur Toilette).

#### Nicht erkennbare Tätigkeiten MX

Bei Abwesenheit des Arbeiters während der REFA-Aufnahme kann es eine Zuordnung zu nicht erkennbaren Tätigkeiten geben.

<sup>43</sup> Vgl. Künstner (1984). REFA in der Baupraxis – Teil 2 Datenermittlung. S. 19

<sup>44</sup> Vgl. Künstner (1984). REFA in der Baupraxis – Teil 2 Datenermittlung. S. 19ff

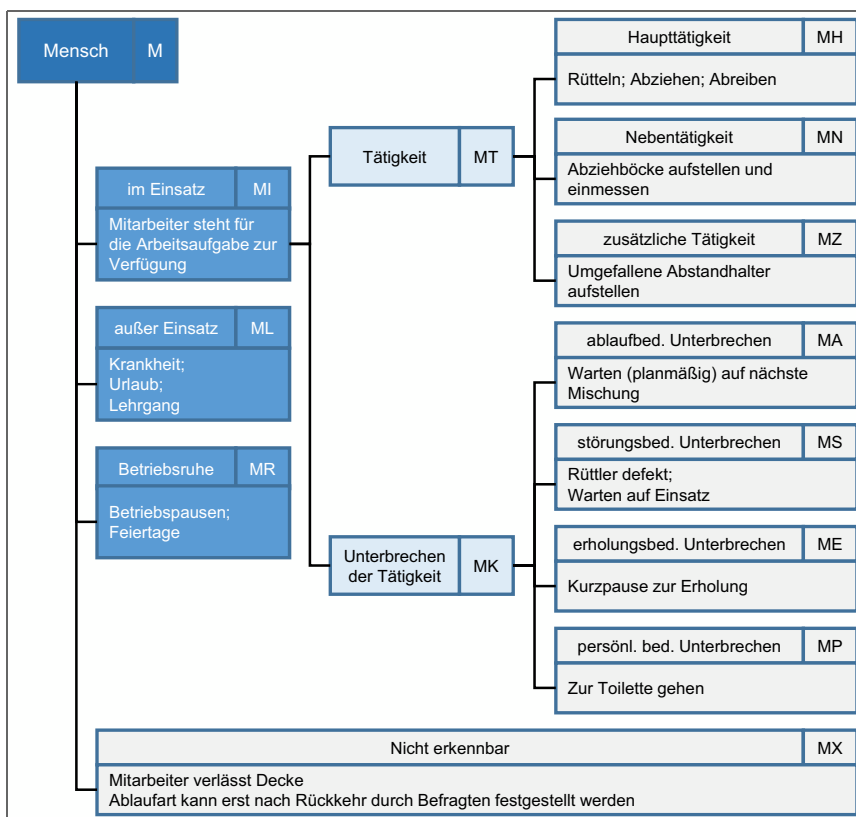


Abb. 3-9 Auf den Menschen bezogene Ablaufarten – Beispiel: Betonieren einer Decke<sup>45</sup>

Die Gliederung der Ablaufarten bezogen auf den Menschen ist in Abb. 3-9 grafisch dargestellt.<sup>46</sup> Diese lassen sich in weiterer Folge in Zeitarten überführen.

### 3.3.3 Definition der Zeitarten

Planmäßige Tätigkeiten und planmäßige Unterbrechungen bilden die sogenannte Grundzeit  $t_g$ , die zum Erreichen des Arbeitsauftrags erforderlich ist. Die Summe der Erholungszeit  $t_{er}$  ergibt sich aus der erforderlichen Erholung des Menschen infolge der ausgeführten Tätigkeit. Die Verteilzeiten  $t_v$  beinhalten die Anteile aus störungsbedingten und persönlich bedingten Unterbrechungen sowie zusätzlichen Tätigkeiten.<sup>47</sup>

Abb. 3-10 zeigt die Zusammensetzung der Zeit je Einheit  $t_e$  [ZEH/MEH]. Anhand dieser Grafik wird die Auswertung der einzelnen Beobachtungen durchgeführt. Die Anteile der unterschiedlichen Zeitarten an der Gesamtzeit sind ein wesentlicher Indikator für die Leistungsbeurteilung.

<sup>45</sup> Vgl. Künstner (1984). REFA in der Baupraxis – Teil 2 Datenermittlung, S. 22

<sup>46</sup> Die Ablaufarten werden teilweise auch abweichend von der Definition nach REFA verwendet: z.B. für die zusätzliche Tätigkeit: „Die Unterkategorie „zusätzliche Tätigkeiten“ umfasst Haupt- und Nebentätigkeiten, die nicht dem eigentlichen Arbeitsauftrag der beobachteten Person entsprechen (z.B. die Kranführertätigkeit eines Maurers).“ Schlagbauer (2011). Entscheidungsgrundlagen für die Arbeitszeitgestaltung, S. 48f  
Auch eine Unterscheidung der erholungsbedingten Unterbrechungen in „vorgegebene Pausen“ und „eigene Pausen“ ist möglich. Vgl. Schlagbauer (2011). Entscheidungsgrundlagen für die Arbeitszeitgestaltung, S. 137ff

<sup>47</sup> Vgl. Künstner (1984). REFA in der Baupraxis – Teil 2 Datenermittlung, S. 28ff

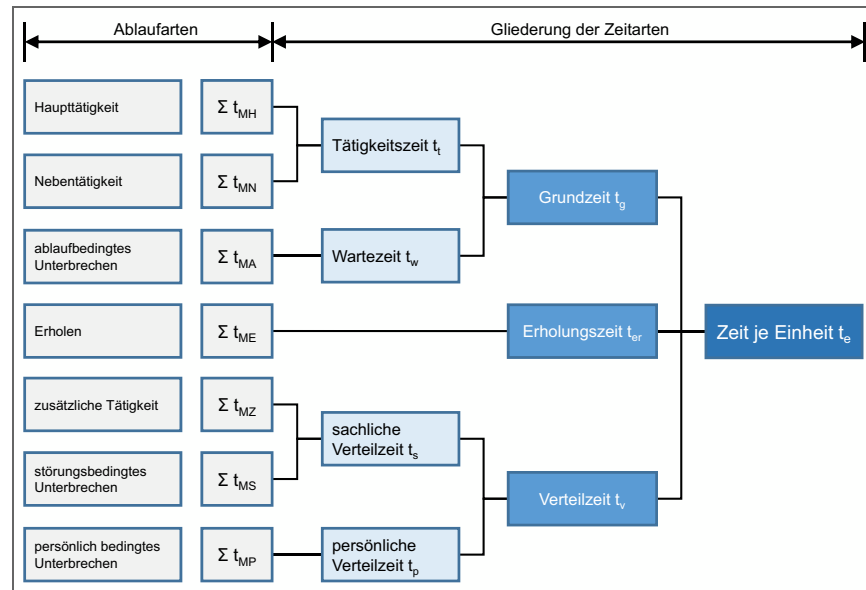


Abb. 3-10 Ableitung der Zeitararten aus den Ablaufarten<sup>48</sup>

Nachfolgend werden die wichtigsten Zeitararten beschrieben.<sup>49</sup>

### Grundzeit

Die Grundzeit  $t_g$  setzt sich aus der Zeit der Haupttätigkeit  $\Sigma t_{MH}$ , der Zeit der Nebentätigkeit  $\Sigma t_{MN}$  und der Zeit für ablaufbedingtes Unterbrechen  $\Sigma t_{MA}$  zusammen (siehe Glg. (3-7)). Sie stellt in der Regel den größten Anteil an der Zeit je Einheit dar.

$$t_g = \Sigma t_{MH} + \Sigma t_{MN} + \Sigma t_{MA} \quad (3-7)$$

### Erholungszeit

Die Erholungszeit  $t_{er}$  dient der Erholung des Menschen. Ihr Anteil hängt von der Höhe und Dauer der Beanspruchung durch die Arbeit ab (die Berechnung erfolgt nach Glg. (3-8)). Ist der Anteil der Erholungszeit groß (Erholungszeit verursacht Kosten), sollte die Arbeitssituation durch arbeitsgestalterische Maßnahmen verbessert werden.

Laut Lang ergibt sich für die Erholungszeit aus langjährigen Messungen ein Anteil von ca. 10 % der Grundzeit.<sup>50</sup> Schlagbauer ermittelte für die Mauerwerksarbeiten einen mittleren Anteil der Erholungszeit von 18,60 %, wobei hier auch die vorgegebenen Pausen mit einem Anteil von 11,52 % inkludiert sind. Wird dieser Anteil abgezogen, ergibt sich für die Erholungszeit („eigene Pausen“) ein Anteil von 7,08 %.<sup>51</sup> REFA gibt für die Erholung einen Richtwert von 5 % der Gesamtarbeitszeit an.<sup>52</sup>

$$t_{er} = \Sigma t_{ME} \quad (3-8)$$

<sup>48</sup> Vgl. Künstner (1984), REFA in der Baupraxis – Teil 2 Datenermittlung, S. 30

<sup>49</sup> Vgl. Künstner (1984), REFA in der Baupraxis – Teil 2 Datenermittlung, S. 28ff

<sup>50</sup> Vgl. Lang (1988), Ein Verfahren zur Bewertung von Bauablaufstörungen und zur Projektsteuerung, S. 109

<sup>51</sup> Vgl. Schlagbauer (2011), Entscheidungsgrundlagen für die Arbeitszeitgestaltung, S. 136ff

<sup>52</sup> Vgl. Riediger/Steinmetzger (2000), Rationalisierung im Baubetrieb: Möglichkeiten der REFA-Methodenlehre, S. 10



### Verteilzeit

Zeiten für zusätzliche Tätigkeiten  $\Sigma t_{MZ}$ , Zeiten für störungsbedingtes Unterbrechen  $\Sigma t_{MS}$  und Zeiten für persönlich bedingtes Unterbrechen  $\Sigma t_{MP}$  ergeben aufsummiert die Verteilzeit  $t_v$  (siehe Glg. (3-9)).

Langjährige Messungen haben ergeben, dass die Verteilzeit bei Bauarbeiten ca. 25 % der Grundzeit beträgt.<sup>53</sup> Schlagbauer ermittelte für die Mauerwerksarbeiten einen Anteil der Verteilzeit von 5,88 % (zusätzliche Tätigkeiten = 2,58 %; störungsbedingte Unterbrechung = 1,82 % und persönlich bedingte Unterbrechung = 1,48 %).<sup>54</sup>

$$t_v = \Sigma t_s + \Sigma t_p = (\Sigma t_{MZ} + \Sigma t_{MS}) + \Sigma t_{MP} \quad (3-9)$$

### Zeit je Einheit

Grundzeit  $t_g$ , Erholungszeit  $t_{er}$  und Verteilzeit  $t_v$  ergeben die Zeit je Einheit  $t_e$  (siehe Glg. (3-10)), die auch als Vorgabezeit für die Ausführung eines Ablaufs durch den Menschen bezeichnet wird.

$$t_e = t_g + t_{er} + t_v \quad (3-10)$$

Die Vorgabezeit ist unabhängig von der Auftragsgröße, kann aber auf eine bestimmte Ausführungsmenge bezogen werden.

### Ausführungszeit

Wird die Vorgabezeit  $t_e$  mit der auszuführenden Menge multipliziert, ergibt sich die Ausführungszeit  $t_a$ .<sup>55</sup>

### Auftragszeit

Zur Ermittlung der Auftragszeit  $T$  muss zur Ausführungszeit noch die individuelle Rüstzeit  $t_r$  addiert werden.<sup>56</sup>

Unter Rüsten wird lt. REFA das Vorbereiten des Arbeitssystems bzw. der Betriebsmittel für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe sowie – falls erforderlich – das Rückversetzen in den ursprünglichen Zustand, beim Menschen seine eigene Vorbereitung auf das Ausführen der Aufgabe (z.B. Auftragsunterlagen lesen), verstanden. Die Rüstzeit  $t_r$  setzt sich wiederum aus der Rüstgrundzeit  $t_{rg}$ , der Rüstverteilzeit  $t_{rv}$  und der Rüsterholungszeit  $t_{er}$  zusammen. Rüstzeiten sind nicht wertschöpfend, belegen aber Kapazitäten, verursachen Kosten und wirken sich auf die Bauzeit aus.<sup>57</sup>

Die Rüstzeit sollte bei der Erfassung von Ist-Zeiten und der Bestimmung von Soll-Zeiten getrennt ausgewiesen werden, da diese nicht direkt vom Umfang einer Arbeit abhängt.<sup>58</sup>

Im nachfolgenden Abschnitt wird festgehalten, welche Ablaufarten in dieser Arbeit als integrale Bestandteile der Aufwandswerte angesehen werden.

<sup>53</sup> Vgl. Lang (1988). Ein Verfahren zur Bewertung von Bauablaufstörungen und zur Projektsteuerung. S. 109

<sup>54</sup> Vgl. Schlagbauer (2011). Entscheidungsgrundlagen für die Arbeitszeitgestaltung. S. 137

<sup>55</sup> Vgl. auch Hoffmann/Motzko/Corsten (2012). Aufwand und Kosten zeitgemäßer Schalverfahren. S. 51

<sup>56</sup> Vgl. auch Hoffmann/Motzko/Corsten (2012). Aufwand und Kosten zeitgemäßer Schalverfahren. S. 51

<sup>57</sup> Vgl. www.refa-lexikon.de – Suchbegriffe: „Rüstzeit“ und „Rüsten“ – Datum des Zugriffs: 26.06.2015

<sup>58</sup> Vgl. Spranz (1975). Arbeitszeiten im Baubetrieb – Ermittlung und Anwendung bei Kalkulation, Arbeitsvorbereitung und Leistungsentlohnung. S. 8f

### 3.3.4 Ablaufarten als Bestandteile von Aufwandswerten

Aus welchen Zeitararten sich Aufwandswerte zusammensetzen, wird anhand von Abb. 3-11 gezeigt.

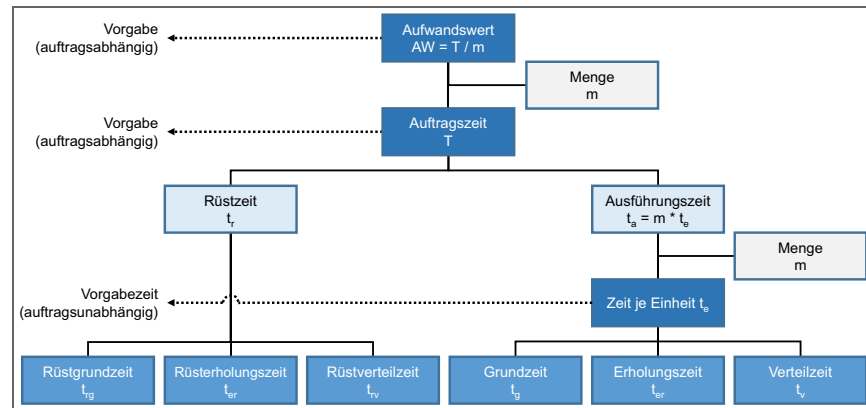


Abb. 3-11 Zusammenfassung von Zeitararten zu Aufwandswerten<sup>59</sup>

Bei der Zeit je Einheit  $t_e$  handelt es sich um eine Vorgabezeit, die auftragsunabhängig für die Erfüllung einer Arbeitsaufgabe angesetzt werden kann.<sup>60</sup> Multipliziert mit der auszuführenden Menge  $m$  ergibt sich die Ausführungszeit  $t_a$ . Für jedes Projekt ist zusätzlich noch eine auftragsabhängige Rüstzeit  $t_r$  zu berücksichtigen. Die Summe aus Rüstzeit  $t_r$  und Ausführungszeit  $t_a$  ergibt in weiterer Folge die Auftragszeit  $T$  (entspricht im Verständnis der österreichischen Bauwirtschaft der Summe der Lohnstunden). Wird diese auftragsabhängige Vorgabe wiederum durch die Ausführungsmenge  $m$  dividiert, erhält man den auftragsabhängigen Aufwandswert  $AW$ .

Bei Literaturangaben bzw. bei eigenen Erhebungen von Aufwandswerten ist besonders darauf zu achten, welche Zeitanteile bei den Betrachtungen berücksichtigt wurden, um geeignete Schlüsse ziehen zu können.

### 3.3.5 Zusammenhang zwischen Zeitanteilen und Produktivitätsverlusten

Treten Produktivitätsverluste auf, werden dadurch unterschiedliche Zeitanteile beeinflusst. Obwohl vermutet werden könnte, dass durch Produktivitätsverluste beispielsweise nur der Anteil störungsbedingter Unterbrechungen ansteigt, wird bei näherer Betrachtung deutlich, dass auch andere Zeitanteile von Produktivitätsverlusten betroffen sein können.

Der Einfluss unterschiedlicher Produktivitätsverluste auf die Ablaufarten nach REFA hängt wesentlich davon ab, welche Vorgangsstufen den jeweiligen Teilvorgängen bzw. in weiterer Folge den Ablaufarten zugeordnet werden. In Tab. 3-2 ist ein Aufnahmeblatt für Multimomentaufnahmen nach der REFA-Systematik dargestellt. Die angeführten Vorgangsstufen beziehen sich auf den Bewehrungseinbau in eine Versuchsgleitschalung.<sup>61</sup>

<sup>59</sup> In Anlehnung an: Künstner (1984). REFA in der Baupraxis – Teil 2 Datenermittlung, S. 32

<sup>60</sup> Die Angabe lt. REFA, dass es sich bei der Zeit je Einheit um eine auftragsunabhängige Vorgabezeit handelt, ist zumindest kritisch zu hinterfragen, da projekt- und baustellenspezifische Einflüsse in den Zeitararten der Zeit je Einheit enthalten sind.

<sup>61</sup> Vgl. TU Graz, Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft (2013). REFA-Studie für den Bewehrungseinbau in eine Versuchsgleitschalung, S. 97f



Die Zuordnung einzelner Vorgangsstufen ist nicht immer eindeutig möglich und bedarf für unterschiedliche Arbeiten immer einer neuen Bewertung und Gliederung.

Ein Produktivitätsverlust (Gründe für Produktivitätsverluste – die in dieser Arbeit vorrangig betrachtet werden – sind in Abb. 3-12 symbolisch dargestellt) kann vielfältige Auswirkungen haben und unterschiedliche Ablaufarten betreffen.

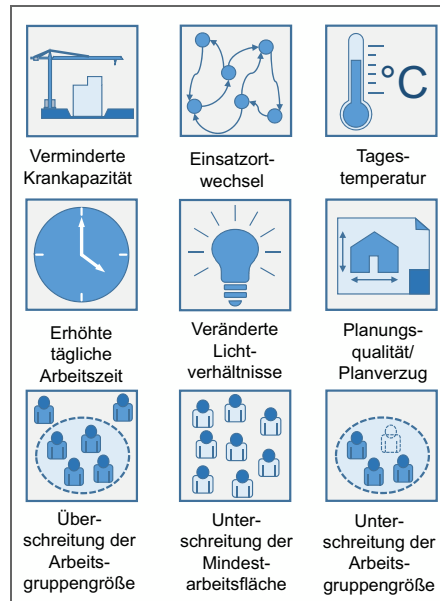


Abb. 3-12 Übersicht der betrachteten Produktivitätsverluste

In Abb. 3-13 werden unterschiedliche Produktivitätsverluste und deren Einfluss auf Ablaufarten demonstrativ dargestellt. Dazu werden für jeden der symbolisch abgebildeten Produktivitätsverluste (PV) demonstrativ Konsequenzen aufgezählt, die sich auf verschiedene Ablaufarten auswirken können.

Beispielsweise bewirken zu hohe oder zu niedrige Außentemperaturen einen generell langsameren Arbeitsablauf und haben damit sowohl Einfluss auf die Haupt- als auch auf die Nebentätigkeiten. Außerdem erhöhen sich die Anteile der Erholungszeiten (Aufwärmen bzw. Abkühlen) und schließlich auch der störungsbedingten Unterbrechungen, da bei Hitze die persönliche Schutzausrüstung als störend empfunden wird und bei Kälte die zusätzliche Kleidung den Bewegungsablauf behindert.

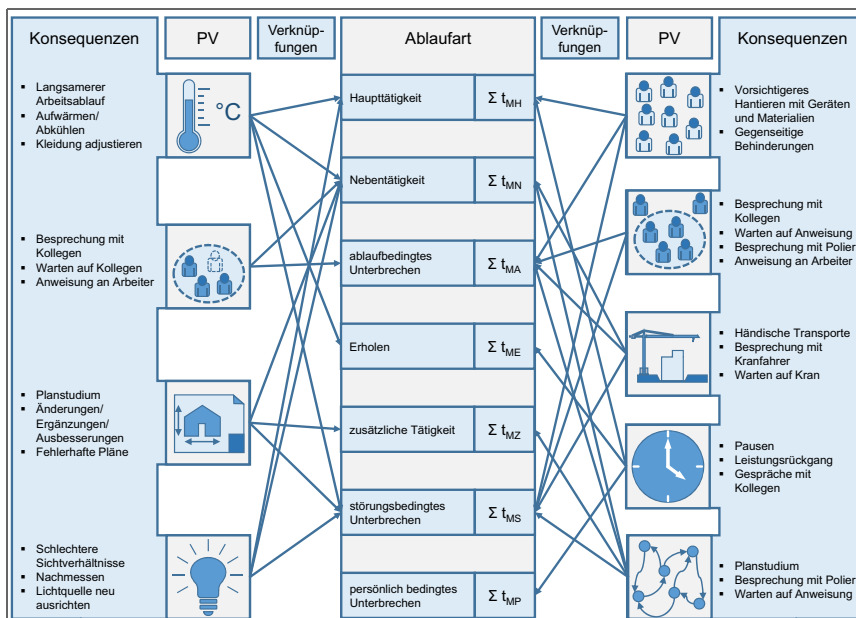


Abb. 3-13 Einfluss von Produktivitätsverlusten auf Ablaufarten – demonstrative Darstellung

### 3.3.6 Differenzierung von Aufwandswerten

Bei der Ermittlung und Verwendung von Aufwandswerten ist eine Differenzierung je nach Betrachtungsgegenstand (Lohnkosten bzw. Ausführungsdauer) vorzunehmen und eine Abgrenzung des Leistungsumfangs erforderlich.<sup>62</sup>

Hoffmann/Motzko/Corsten weisen darauf hin, dass der Aufwand in Bezug auf die Arbeitszeit ((Akkord-)Aufwandsrichtwert) vom Kalkulationsrichtwert im Sinne der Kostenbestimmung abzugrenzen ist.<sup>63</sup>

Es ist demnach grundsätzlich zwischen Aufwandswerten, die für die Baukostenermittlung und jenen die für die Bauzeitermittlung herangezogen werden, zu unterscheiden (siehe Abb. 3-14). Bei der Baukostenermittlung sind vor allem die aufgewendeten Lohnstunden – unabhängig von deren Beziehung bzw. zeitlichen Versätzen – von Interesse. Bei der Bauzeitermittlung bzw. der Terminplanung ist die Zeit, die für die einzelnen Tätigkeiten aufgewendet wird, im Zentrum der Betrachtung. Hierbei müssen Versätze zwischen den Tätigkeiten berücksichtigt werden. Für die Terminplanung ist vor allem der kritische Weg, der bei Verzögerungen Auswirkungen auf den Endtermin hat, essentiell. Randstunden<sup>64</sup>, die abseits des kritischen Wegs durchgeführt werden, spielen für die Terminplanung nur eine untergeordnete Rolle, weshalb sich für die Terminplanung ein geringerer Aufwandswert (reduziert um Zeiten am nicht kritischen Weg) für die Tätigkeiten ergibt.

<sup>62</sup> Vgl. Motzko/Boska (2013). Ermittlung von Aufwandswerten bei Schalungsarbeiten im Sichtbetonbereich. S. 18

<sup>63</sup> Vgl. Hoffmann/Motzko/Corsten (2012). Aufwand und Kosten zeitgemäßer Schalverfahren. S. 23

<sup>64</sup> „Randstunden: Stunden, die für Vorbereitungs- und Abschlussarbeiten oder für mehrfach wiederholte Teilleistungen (z.B. Reinigen der Schalung vor dem Umsetzen) anfallen. Sie sind ein Teil der Leistungsstunden. Bei der Ermittlung von Aufwandswerten (z.B. Std./m<sup>2</sup>) oder bei deren Verwendung ist darauf zu achten, ob die R. anteilig im Aufwandswert enthalten sind oder nicht.“ Oberdorfer/Jodl et al. (2001). Handwörterbuch der Bauwirtschaft. S. 128

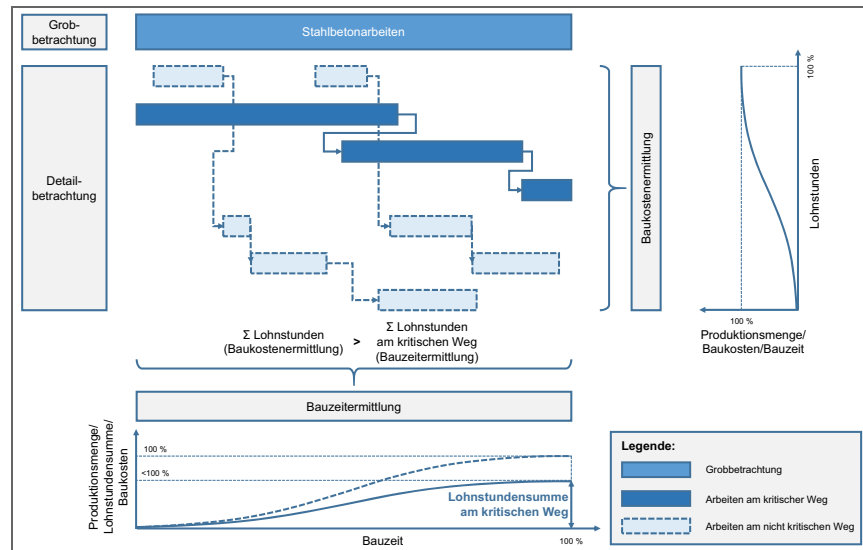


Abb. 3-14 Differenzierung der Betrachtungstiefe

In dieser Arbeit werden ausschließlich Grobetrachtungen (auf Ebene der Stahlbetonarbeiten) für ein gesamtes Bauwerk durchgeführt. Es handelt sich also um eine „verschmierte“ Betrachtung über die gesamte Bauzeit. Eine Differenzierung der Aufwandswerte für die Baukosten- und Bauzeitermittlung erfolgt nicht, da für beide Betrachtungen die Summe der Lohnstunden unverändert bleibt. Für die Ermittlung der Bauzeit (Globalbetrachtung) ist entscheidend, welche durchschnittliche tägliche Leistung erzielt wird bzw. wieviele Lohnstunden im Durchschnitt je Zeitstunde erbracht werden können.

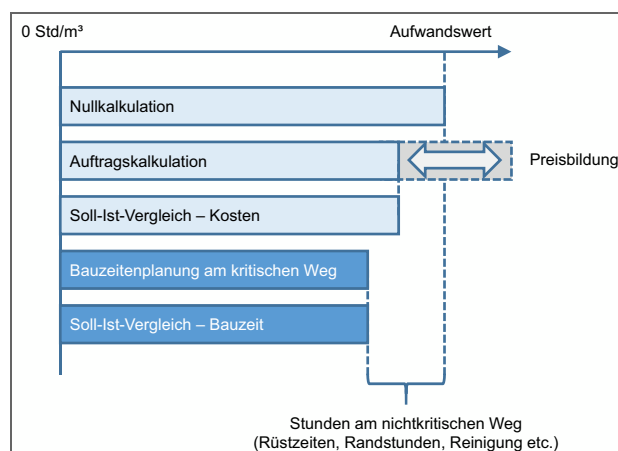


Abb. 3-15 Differenzierung von Aufwandswerten

Für Detailbetrachtungen ist in Ausführungs- und Kalkulationsrichtwerte zu unterscheiden. Hier wird der Aufwandswert für die Nullkalkulation<sup>65</sup> einen höheren Wert annehmen als jener für die Bauzeitermittlung bzw. Terminplanung (siehe Abb. 3-15). Die Nullkalkulation dient der internen Ermittlung der zu erwartenden Kosten. Werden die einzelnen Balken eines Terminplans

<sup>65</sup> „Nullkalkulation: Ermittlung kostendeckender Preise für später zu erbringende Bauleistungen; ohne spekulative Elemente.“ Oberndorfer/Jodl et al. (2001). Handwörterbuch der Bauwirtschaft. S. 36

ermittelt, müssen Randstunden aus den Aufwandswerten herausgerechnet werden, um den kritischen Weg nicht falsch (aufgrund zu langer Balken) abzubilden. Die Randstunden werden am nicht kritischen Weg ausgeführt. Aufwandswerte für die Auftragskalkulation<sup>66</sup> können je nach strategischen Überlegungen der Preisbildung sowohl nach oben oder unten von jenen der Nullkalkulation abweichen. Soll-Ist-Vergleiche der Kosten beziehen sich in weiterer Folge auf die Aufwandswerte, die der Auftragskalkulation zugrunde gelegt wurden.

### 3.4 Leistung

Die Leistung wird neben den genannten Parametern von zahlreichen weiteren Einflüssen bestimmt (siehe Abb. 3-16). Gleiche Leistungswerte bedeuten aber in der Regel nicht, dass auch die Produktivität identisch ist.<sup>67</sup> Unterschiede resultieren beispielsweise aus der unterschiedlichen Arbeitsproduktivität.<sup>68</sup>

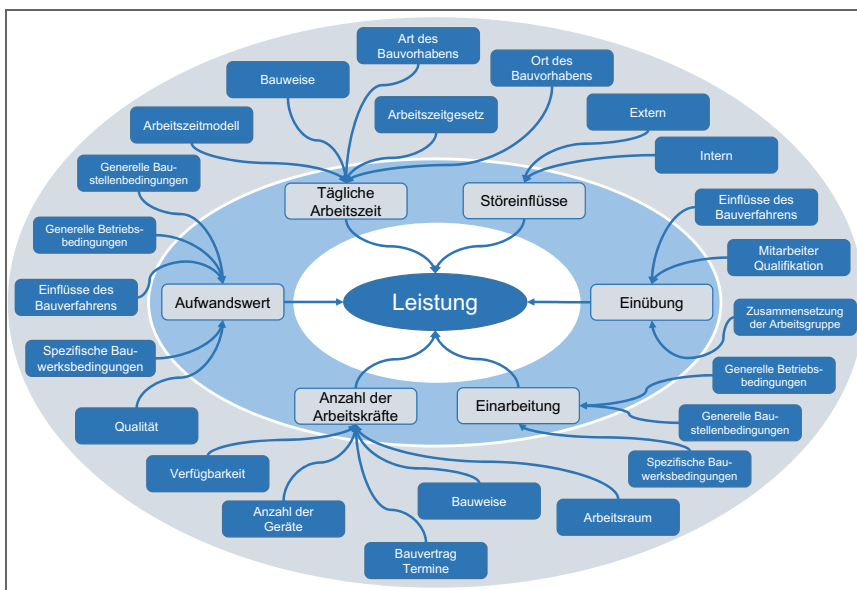


Abb. 3-16 Demonstrative Aufzählung der Einflüsse auf die Leistung der Rohbauarbeiten<sup>69</sup>

Die Arbeitsleistung [MEH/ZEH] wird direkt durch den Aufwandswert sowie durch die täglich erzielbare Anzahl an Lohnstunden je Zeitstunde bestimmt.

Die durchschnittliche tägliche Leistung der Stahlbetonarbeiten  $L_{STB}$  [m<sup>3</sup>/d] wird mit der mittleren Anzahl an Arbeitskräften  $AK_{STB,MW}$  [Std/h], der täglichen Arbeitszeit  $AZ_{STB}$  [h/d] und dem Gesamt-Aufwandswert der Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB}$  [Std/m<sup>3</sup>] wie folgt berechnet:

<sup>66</sup> „Angebotskalkulation: Veränderung der Nullkalkulation zufolge Umlagenaufteilung.“ Oberndorfer/Jodl et al. (2001). Handwörterbuch der Bauwirtschaft. S. 36

<sup>67</sup> Ob für das Erreichen einer mittleren täglichen Leistung von 10 m<sup>3</sup>/d nur 10 Arbeitskräfte oder 15 eingesetzt werden, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Arbeitsproduktivität.

<sup>68</sup> Vgl. Hofstadler (2007). Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 18f

<sup>69</sup> Vgl. Hofstadler (2007). Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 18

$$L_{\text{STB}} = \frac{AK_{\text{STB,MW}} \cdot AZ_{\text{STB}}}{AW_{\text{STB}}} \quad (3-11)$$

Wird eine bestimmte Bauzeit vorgegeben, kann durch eine Rückrechnung über die Herstellungsmenge die mittlere erforderliche Leistung ermittelt werden. Für die Stahlbetonarbeiten wird dazu nach Glg. (3-12) die Stahlbetonmenge  $BT_M$  [m<sup>3</sup>] durch die Dauer für die Stahlbetonarbeiten  $D_{\text{STB}}$  [d] dividiert.

$$L_{\text{STB}} = \frac{BT_M}{D_{\text{STB}}} \quad (3-12)$$

Der Zusammenhang zwischen Aufwandswert, Leistung und Produktivität wird im nächsten Abschnitt hergestellt.

### 3.5 Zusammenhang zwischen Aufwandswert, Arbeitsproduktivität und Leistung

Produktivität und Aufwandswerte haben einen direkten Zusammenhang und können ineinander übergeführt werden. Steigt der Aufwandswert, sinkt die Produktivität und umgekehrt. Die absolute Veränderung in der Produktivität  $\Delta PV$  [MEH/Std] kann durch Glg. (3-13) ermittelt werden. Dazu wird die Differenz zwischen den Reziprokwerten des Soll-Aufwandswerts  $AW_{\text{SOLL}}$  [Std/MEH] und des Ist-Aufwandswerts  $AW_{\text{IST}}$  [Std/MEH] errechnet.<sup>70</sup>

$$\Delta PV = \frac{1}{AW_{\text{SOLL}}} - \frac{1}{AW_{\text{IST}}} \quad (3-13)$$

Die relative Veränderung der Produktivität folgt aus Glg. (3-14).

$$\Delta PV = \left( \frac{\frac{1}{AW_{\text{SOLL}}} - \frac{1}{AW_{\text{IST}}}}{\frac{1}{AW_{\text{SOLL}}}} \right) \cdot 100 \% \quad (3-14)$$

Wurden die Stahlbetonarbeiten für ein Bauprojekt z.B. mit 10 Std/m<sup>3</sup> kalkuliert und konnte der Ist-Aufwandswert in der Bauausführung mit 15 Std/m<sup>3</sup> gemessen werden, beträgt die Aufwandswerverhöhung 50 % gegenüber der Urkalkulation (siehe Abb. 3-17). Diese Erhöhung des Aufwandswerts bedeutet eine 33%ige Reduktion der Arbeitsproduktivität von ursprünglich 0,100 m<sup>3</sup>/Std auf ca. 0,067 m<sup>3</sup>/Std. Durch Einsetzen in Glg. (3-13) wird die absolute Reduktion mit 0,033 m<sup>3</sup>/Std berechnet.<sup>71</sup>

$$\Delta PV = \frac{1}{10,0 \text{ Std/m}^3} - \frac{1}{15,0 \text{ Std/m}^3} = 0,033 \text{ m}^3/\text{Std}$$

Die relative Veränderung wird auf die Produktivität im Soll-Zustand (= 0,100 m<sup>3</sup>/Std) bezogen und damit der Prozentsatz für den Produktivitätsverlust berechnet.<sup>72</sup>

<sup>70</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 35

<sup>71</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 35

<sup>72</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 35



$$\Delta PV = \left( \frac{\frac{1}{10,0 \text{ Std/m}^3} - \frac{1}{15,0 \text{ Std/m}^3}}{\frac{1}{10,0 \text{ Std/m}^3}} \right) \cdot 100 \% = 33,33 \%$$

Die relative Veränderung der Leistung wird auf die Soll-Leistung bezogen und damit der Prozentsatz für den Leistungsverlust berechnet (siehe Glg. (3-15)). Für die Berechnung der Leistung ist Glg. (3-11) anzuwenden.<sup>73</sup>

$$\Delta L = \left( \frac{L_{\text{SOLL}} - L_{\text{IST}}}{L_{\text{SOLL}}} \right) \cdot 100 \% \quad (3-15)$$

Für die Berechnung der Soll-Leistung wird angenommen, dass zehn Arbeitskräfte (10,00 h/Std) für zehn Stunden (10,00 h/d) eingesetzt werden. Die Soll-Leistung  $L_{\text{SOLL}}$  ergibt sich dann mit 10,00 m<sup>3</sup>/d.

Im Ist hat sich der Aufwandswert auf 15,00 Std/m<sup>3</sup> erhöht, die Anzahl der Arbeitskräfte und die tägliche Arbeitszeit bleiben unverändert. Die Ist-Leistung  $L_{\text{IST}}$  errechnet sich demnach mit 6,67 m<sup>3</sup>/d.

Die prozentuelle Leistungsreduktion ergibt sich in weiterer Folge durch Einsetzen der Soll- und Ist-Leistung in Glg. (3-15):

$$\Delta L = \left( \frac{10,00 \text{ m}^3/\text{d} - 6,67 \text{ m}^3/\text{d}}{10,00 \text{ m}^3/\text{d}} \right) \cdot 100 \% = 33,33 \%$$

Der Konnex zwischen Aufwandswert, Arbeitsproduktivität und Leistung ist in Abb. 3-17 durch vertikale Balken dargestellt. Steigt der Aufwandswert und damit der Balken links im Bild, sinken gleichzeitig die Balken für die Arbeitsproduktivität sowie für die Leistung (in der Mitte bzw. rechts in Abb. 3-17).<sup>74</sup>

Für die Darstellung des Zusammenhangs wurden lediglich die Auswirkungen auf die Arbeitsproduktivität betrachtet.

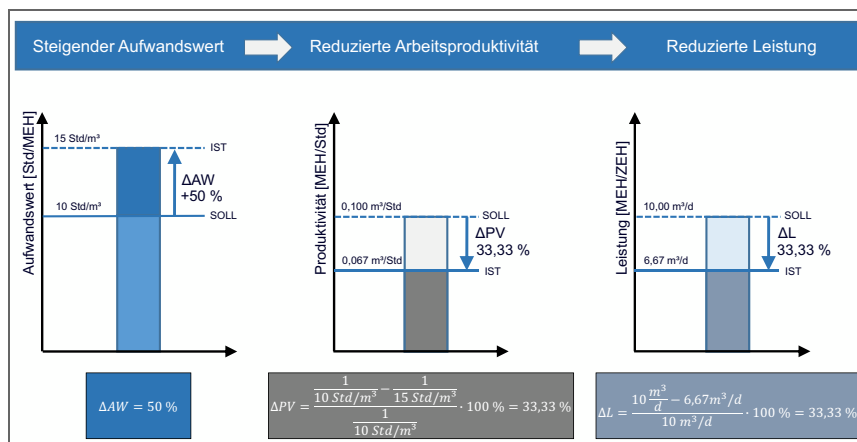


Abb. 3-17 Zusammenhang zwischen Aufwandswert, Produktivität und Leistung<sup>75</sup>

<sup>73</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 36

<sup>74</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 35f

<sup>75</sup> Vgl. Watzlik/Hofstadler/Kummer (2014). Modellbildung zur systematischen Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten und Forcierungsmaßnahmen in der Kalkulation. S. 212



## 4 Unsicherheiten und Nichtlinearitäten im Baubetrieb und in der Bauwirtschaft

In diesem Kapitel wird auf Unsicherheiten bei der Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten eingegangen. Weiters wird der Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener bzw. zur Verfügung stehender Bauzeit beleuchtet. Die Problematik linearer Ansätze bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten sowie die Möglichkeiten bei der Berücksichtigung mehrerer gleichzeitig auftretender Produktivitätsverluste werden gezeigt. Hier wird einerseits in eine reine Addition, andererseits in eine Aggregation von Produktivitätsverlusten unterschieden.

### 4.1 Baukosten- und Bauzeitermittlung unter Unsicherheit

Die Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten bildet eine der wichtigsten und verantwortungsvollsten Aufgaben in der Bauwirtschaft und beeinflusst entscheidend den wirtschaftlichen Erfolg eines Bauprojekts. Sowohl vom AG als auch vom AN werden in unterschiedlichen Projektphasen Kosten und Zeiten ermittelt und für weitere Überlegungen und Entscheidungen herangezogen. Da es sich bei diesen Betrachtungen immer um einen Blick in die Zukunft handelt, sind entsprechende Unsicherheiten mit diesen Ermittlungen verbunden.

#### 4.1.1 Aussagen über die Zukunft

Je nach Tiefe und zeitlichem Horizont (kurz-, mittel- oder langfristig) werden Aussagen über die Zukunft unterschiedlich bezeichnet. Eine Auflistung verschiedener Begriffe (die Zukunft betreffend) sind in Abb. 4-1 gemeinsam mit einer demonstrativen Aufzählung entsprechender Kriterien sowie Beispielen aufgelistet.

Die Kostenplanung bildet eine gedankliche Vorbereitung zukünftiger Handlungen, bei der mit steigender Projektdauer eine erhöhte Kostensicherheit bei gleichzeitig vermindertem Handlungsspielraum angegeben werden kann. Der Terminus der „Prophezeiung“ erinnert stark an antike Orakel, die ein zukünftiges Ereignis vorraussagten, welches durch gegenwärtige Tätigkeiten nicht beeinflussbar ist und somit keine Planung darstellt. Davon verschieden sind Prognosen. Diese stützen ihren Vorhersagegehalt auf gegenwärtige und historische Daten. Prognosen sind keine Planung – dass in der Ausführungsplanung von schönem Wetter ausgegangen wird, verhindert noch nicht, dass es regnet. Eine aktive Gestaltung der Daten bzw. des zukünftigen Handelns ist durch eine Prognose nicht möglich, allerdings stellt diese ein Werkzeug der Kosten- und Terminplanung dar.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vgl. Lechner (2010). Kostenplanung, Normen, Regelwerke. S. 13

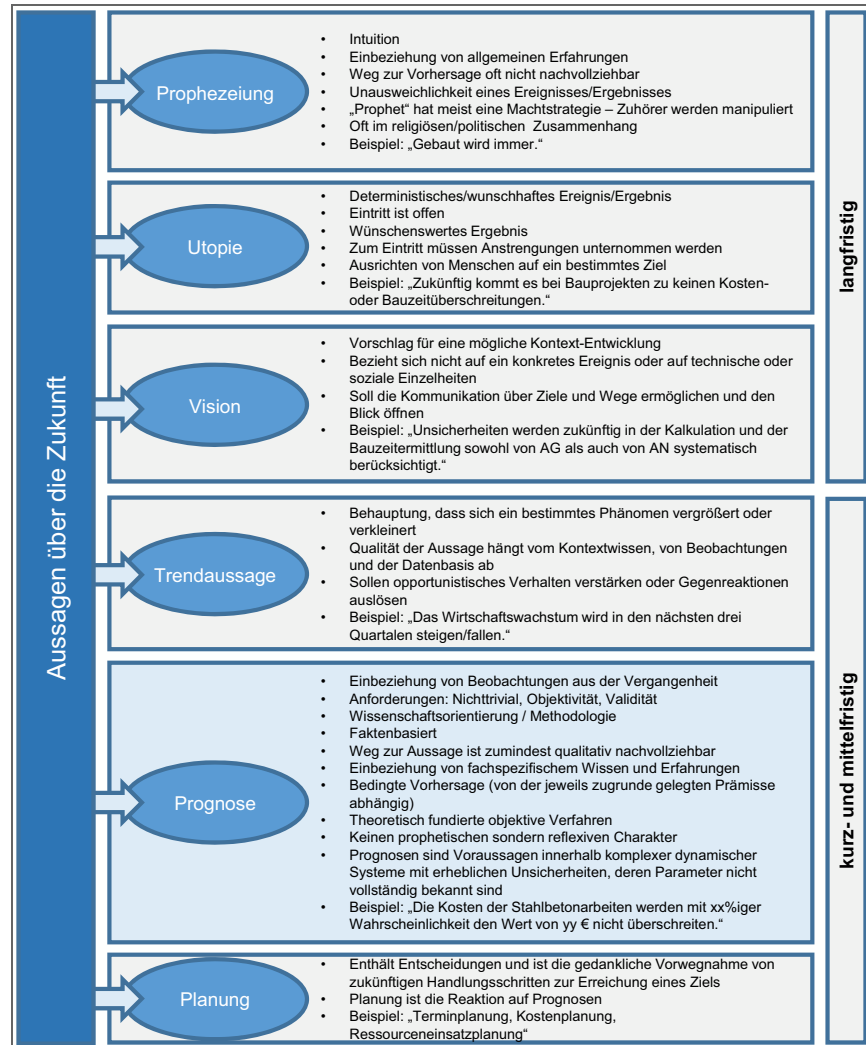


Abb. 4-1 Differenzierung zwischen verschiedenen Stufen und Arten von Aussagen über die Zukunft<sup>2</sup>

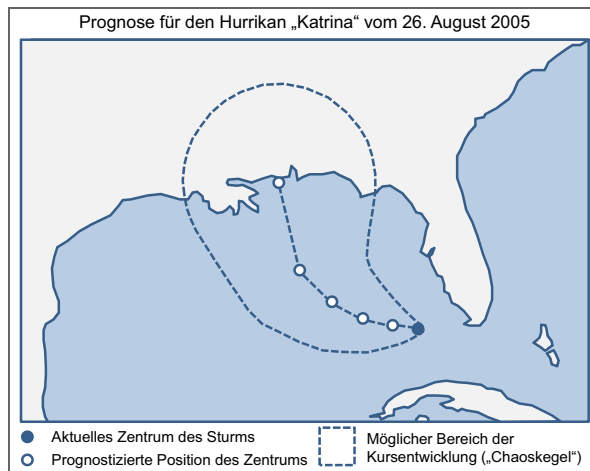
Auf die Ergebnisse bzw. Interpretation einer Prognose kann aber planerisch reagiert werden. Um beim Beispiel mit dem Regen zu bleiben: Wird ein Regenschauer prognostiziert, kann durch die Mitnahme eines Schirms darauf reagiert werden. Es ist nicht unausweichlich, dass man nass wird. Prognosen dienen dazu, mögliche Risiken sowie potentielle Chancen in der Zukunft so früh wie möglich zu erkennen, um darauf reagieren zu können.

Unsicherheiten bei der Prognose von zukünftigen Ereignissen sind in vielen Bereichen anzutreffen. Bei Wettervorhersagen wird beispielsweise versucht, anhand von Modellen ein hochgradig komplexes und dynamisches System (Wetter) zu beschreiben und Aussagen über zukünftige Ereignisse zu treffen.

Bei Wettervorhersagen für Hurrikans wird von den Meteorologen ein „Chaoskegel“ („Cone of Uncertainty“) angegeben, der den möglichen Bereich

<sup>2</sup> In Anlehnung an: Horx Zukunftsinstitut GmbH (2010). Prognose – Prophezeiung – Vision – Semantische Unterschiede von Zukunfts-Aussagen (Online verfügbar unter: <http://www.horx.com/Zukunftsforschung/Docs/01-G-09-Prognose-Vision-Prophezeiung.pdf>. Datum des Zugriffs: 28.07.2015). <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/4546/prognose-v11.html>. Datum des Zugriffs: 26.07.2015

auf einer Landkarte angibt, in dem ein Hurrikan auf die Küste treffen könnte. Abb. 4-2 zeigt schematisch einen solchen Chaoskegel für den Hurrikan „Katrina“ vom 26. August 2005 um 17:00 Uhr. In der Mitte des Kegels ist jeweils die Position des Zentrums des Hurrikans eingezeichnet. Je weiter die Vorhersage in die Zukunft reicht, desto größer wird auch die Streuung der möglichen Orte, an denen der Sturm auf die Küste treffen kann.



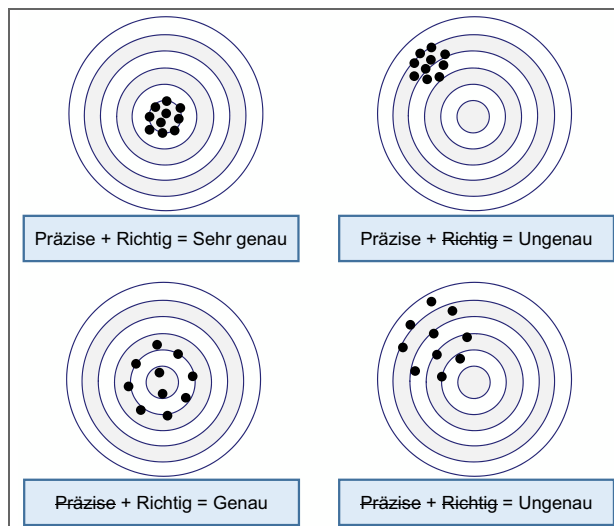
**Abb. 4-2** Prognose des Chaoskegels für den Hurrikan „Katrina“ (26. August 2005; 17:00 Uhr) – mögliche Position des Hurrikanzentrums für die nächsten drei Tage<sup>3</sup>

Wie für Wettervorhersagen sollte es auch in der Bauwirtschaft das Ziel sein, Aussagen über zukünftige Entwicklungen eines Systems unter Berücksichtigung von Unsicherheiten zu treffen. Auch hier gilt, je weiter die Ereignisse in der Zukunft liegen bzw. je früher Entscheidungen über unsichere Umstände getroffen werden sollen, desto größer wird die Spannweite möglicher Ergebnisse sein. Dies liegt in der Natur von Systemen, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Hier deterministische Berechnungen durchzuführen spiegelt eine nicht vorhandene Genauigkeit wider, die es in frühen Projektphasen und auch noch während der Ausführung gar nicht geben kann.

#### 4.1.2 Genauigkeit der Vorhersagen

Deterministische Berechnungen für zukünftige Ereignisse suggerieren sehr genaue (präzise und richtige) Ergebnisse (zur Unterscheidung der Begrifflichkeiten siehe Abb. 4-3), obwohl sich diese in weiterer Folge als zwar sehr präzise aber nicht richtig und damit ungenau herausstellen. Bei probabilistischen Berechnungen werden die vorherrschenden Unsicherheiten bewusst integriert und auch in den Ergebnissen (in Form von Histogrammen) dargestellt. Ziel ist es genaue Ergebnisse zu erhalten und durch die Wahl eines entsprechenden Chancen-Risiko-Verhältnisses die „sich bewegende Zielscheibe“ der Kosten und Bauzeiten möglichst zentral zu treffen (siehe Abb. 4-3).

<sup>3</sup> Vgl. National Hurricane Center (Internetquelle: [http://www.nhc.noaa.gov/archive/2005/KATRINA\\_graphics.shtml](http://www.nhc.noaa.gov/archive/2005/KATRINA_graphics.shtml). Datum des Zugriffs: 19.10.2014)



**Abb. 4-3** Unterscheidung zwischen präzisen und richtigen Vorhersagen<sup>4</sup>

Die Berechnung bzw. die Prognose eines einzelnen Kostenwerts für ein gesamtes Gebäude oder auch nur für Teile davon, stellt die Vortäuschung einer Genauigkeit dar, die nicht erreicht werden kann. Bei Bemessungen im konstruktiven Ingenieurbau wird nach Modellen gerechnet, welche Streuungen und Unsicherheiten von Materialeigenschaften und Belastungen bestmöglich berücksichtigen. Diesem Unschärfeproblem wird mit dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept begegnet (Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten). In der Kostenermittlung und der Terminplanung werden diese Unsicherheiten meist mit Puffern abgedeckt.<sup>5</sup>

In den konstruktiven Ingenieurwissenschaften kann auf erprobte und durch Versuche belegte Stoffgesetze zurückgegriffen werden. Für die Bauwirtschaft und den Baubetrieb fehlen solche mathematisch formulierten Gesetzmäßigkeiten und auch die Erhebung allgemein gültiger empirischer Daten gestaltet sich als schwierig, aufgrund ständig wechselnder äußerer und innerer Einflüsse.

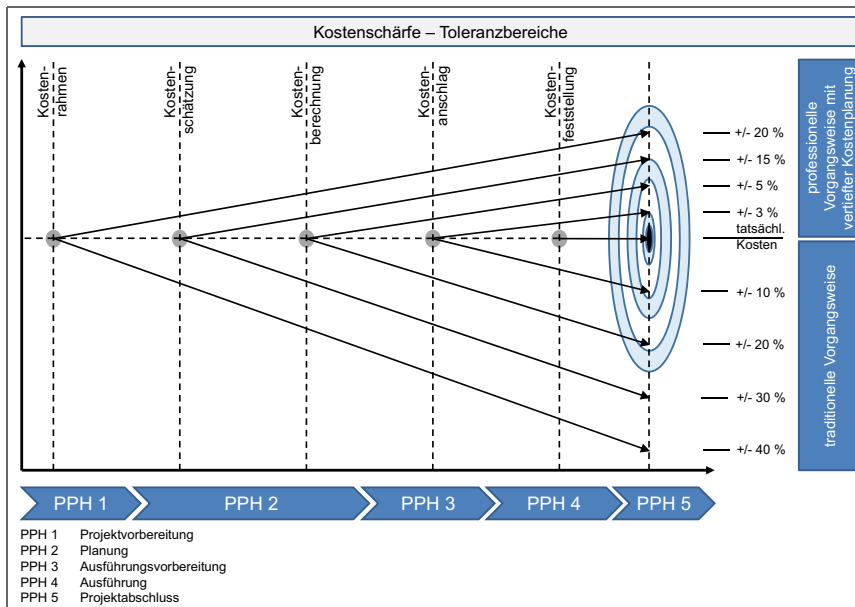
Wie es aber im konstruktiven Ingenieurbau Bestrebungen gibt probabilistische Bemessungsverfahren zu etablieren<sup>6</sup>, sollte auch die Bauwirtschaft und der Baubetrieb dahingehend Untersuchungen und Anwendungsmöglichkeiten in Betracht ziehen und die Anwendung probabilistischer Verfahren forcieren.

Kostenprognosen können mit einem Dartspiel verglichen werden, bei dem es immer wahrscheinlicher wird in die Mitte der Scheibe zu treffen – und damit die endgültigen Herstellkosten vorherzusagen – je weiter man sich ihr nähert. In Abb. 4-4 sind jene Toleranzbereiche für die Kostenplanung dargestellt, die bei professionellem Vorgehen erreicht werden sollten und jene, bei denen ein Planer, im Falle einer Überschreitung, mit Haftungskonsequenzen laut deutscher Judikatur zu rechnen hat.<sup>7</sup>

<sup>4</sup> Siehe dazu auch DIN ISO 5725-1:1997 – Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen. S. 15f

<sup>5</sup> Vgl. Hofstadler (2011). Berechnung der Bauzeit – Systematischer Umgang mit Projektunsicherheiten. S. 32f

<sup>6</sup> Wird als „konstruktive Zuverlässigkeitsanalyse“ bezeichnet. Vgl. Köhler (2012). Risiko und Sicherheit im Bauwesen – Seminarunterlagen.



**Abb. 4-4** Kostentoleranzen bei professioneller Kostenplanung bzw. bei traditioneller Vorgehensweise<sup>8</sup>

Kosten- und Bauzeitprognosen bzw. -berechnungen und die dafür zugrunde liegenden Modelle bilden lediglich eine Approximation der Wirklichkeit, bei der die Ergebnisse nur so gut sein können, wie die getroffenen Annahmen und die verwendeten Grunddaten. Das Modell selbst besitzt keine Intelligenz, es bedarf daher in jedem Fall der kritischen Beurteilung und Validierung durch Spezialisten.<sup>9</sup>

Die Berechnung von Kosten kann in zeitlicher Dimension in zwei Rechenarten unterschieden werden:<sup>10</sup>

- eine Vergangenheitsrechnung (auch als Ist-Rechnung bezeichnet) und
- eine Zukunftsrechnung, die auch als Soll-Rechnung bzw. Kalkulation bezeichnet wird.

Bei einer Vergangenheitsrechnung sind die Kostenkomponenten und Berechnungsparameter meist sehr genau bekannt. Sie stellt eine Nachbetrachtung bereits durchgeführter Arbeiten und Leistungen dar.

Die Zukunftsrechnung oder Kalkulation ist dadurch geprägt, dass sie zukünftige Handlungen kostenmäßig vorhersagen soll. Solche Berechnungen sind geprägt von Unsicherheiten sowie von unvorhergesehenen und unvorhersehbaren Ereignissen. Es sind damit immer gewisse Abweichungen von den Kalkulationen zu erwarten, da der Informationsstand naturgemäß bei einer Zukunftsbetrachtung nie die Dimension einer Vergangenheitsbetrachtung erreichen kann, auch bei noch so genauer Planung. Der Grad der

<sup>7</sup> Vgl. Lechner (2007). Vergleichende Beurteilung von (Bau-) Kostenaussagen in frühen Planungsphasen. Präsentation. Graz. 17.04.2007. Folie 44

Vgl. Kummer (2012). Einsatz der Monte-Carlo Simulation zur Berechnung von Baukosten und Bauzeit. S. 16

<sup>8</sup> In Anlehnung an: Lechner (2007). Vergleichende Beurteilung von (Bau-) Kostenaussagen in frühen Planungsphasen. Präsentation. Graz. 17.04.2007. Folie 44

<sup>9</sup> Vgl. Scherer (2010). Mefisto – Partnerschaftliche Nutzung von Multi-Modellinformationen zur Steuerung, Simulation und Führung von Bauprojekten. S. 23

<sup>10</sup> Vgl. Blecken/Meinen/Sundermeier (2012). Immobilien-Projektentwicklung – Quantitative Ökonomische Modelle. S. 4

Unsicherheit wird dabei immer größer, je weiter der Zeitpunkt, für den eine Aussage getroffen werden soll, in der Zukunft liegt.

Es sei hier auch darauf hingewiesen, dass nach einer gewissen Zeit auch Vergangenheitsbetrachtungen unter Unsicherheiten durchgeführt werden müssen. Dies begründet sich dadurch, dass Informationen nicht in ausreichendem Umfang und/oder mit der nötigen Detaillierung dokumentiert, die Abgrenzung von Leistungen nicht eindeutig durchgeführt werden kann oder die Erinnerungen von beteiligten Personen verschwimmen. Weiters kann es dazu kommen, dass Speichermedien nicht mehr gelesen werden können oder Aufzeichnungen verloren gehen bzw. vernichtet wurden. Dieser Umstand ist bei der Nachbetrachtung von Bauprojekten in Form von Gutachten immer wieder im Zuge der Beweissicherung feststellbar. D.h. Kosten- und Zeitenberechnungen können nur in einem sehr engen zeitlichen Bereich mit hoher Zuverlässigkeit durchgeführt werden.

Sollen Informationen aus abgeschlossenen Projekten gewonnen werden, ist eine sogenannte Wissensarbeit erforderlich und eine entsprechende Dokumentation durchzuführen. Wird dies nicht berücksichtigt, werden die Unsicherheiten für die Kalkulation zukünftiger Projekte nicht verringert und die Zukunftsrechnung wird mit Werten durchgeführt die „schon immer so angesetzt wurden“. Wie soll aber eine Aussage über das „Morgen“ getroffen werden, wenn nicht einmal bekannt ist was „gestern“ passiert ist?

Eine Verbesserung zukünftiger Aussagen auf Basis von abgeschlossenen Projekten ist durch eine systematische Vergangenheitsrechnung, Dokumentation und Nachbetrachtung möglich. Für die Kalkulation können dadurch Bandbreiten eingeengt oder zumindest besser abgeschätzt werden – Unsicherheiten bleiben jedoch immer bestehen.

Vorhersagen und Prognosen sind für Bauprojekte trotz der vorhandenen Unsicherheiten erforderlich und auch in den Leistungsbildern der Auftraggebervertreter (in Form von Kostenschätzungen, Kostenberechnungen, Terminplanung etc. je nach Leistungsphase) teilweise enthalten.<sup>11</sup>

Blecken gibt an, dass die Annahme eines deterministischen Produktionsgeschehens das Produktionsmodell zu sehr vereinfacht und die Prognosequalität eines deterministischen Modells nur bedingt gültig ist.<sup>12</sup>

#### 4.1.3 Vorhersagen von Baukosten und Bauzeit durch AG und AN

Die Beeinflussbarkeit bzgl. der Projektkosten ist in den ersten Leistungsphasen (siehe Abb. 4-5) am größten und nimmt dann sukzessive ab. In der Phase der Vorbereitung der Vergabe (LPH6) bzw. während der Bauausführung (LPH7) ist der Einfluss auf die Kosten im Vergleich zur Phase der Projektvorbereitung (LPH0) bereits stark eingeschränkt, jedoch erreicht die Kenntnis über die Ausführungskosten in dieser Phase das erste Mal (auf Basis einer detaillierten Ausschreibung) eine relevante Genauigkeit. Weiters ist in Abb. 4-5 in der Ausführungsphase (LPH7) wieder ein Anstieg bei der Beeinflussbarkeit der Kosten zu erkennen.<sup>13</sup>

<sup>11</sup> Vgl. Lechner/Stifter (2015). Kommentar zu Leistungsbild Architektur – HOAI 2013 – LM.VM.2014.

<sup>12</sup> Vgl. Blecken (1976). Die Produktions- und Kostentheorie im instationären Baubetrieb. S. 208

<sup>13</sup> Vgl. Lechner (2010). Kostenplanung, Normen, Regelwerke. S. 11



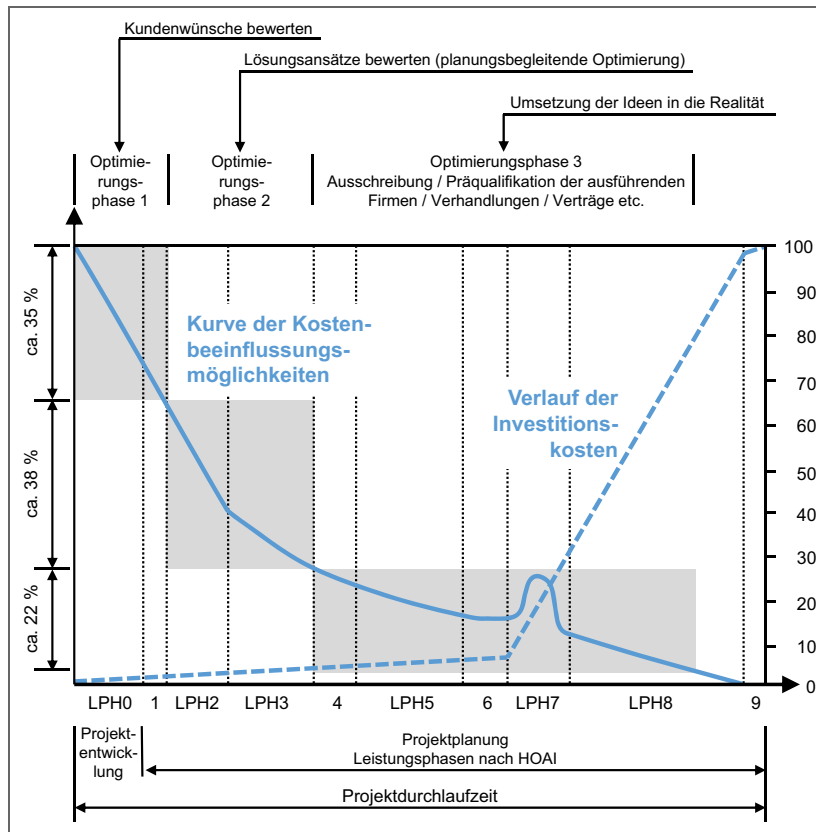


Abb. 4-5 Beeinflussbarkeit der Kosten über die Projektdurchlaufzeit<sup>14</sup>

Der Bieter bzw. der spätere AN tritt erst mit der Angebotsbearbeitung bzw. dem Zuschlag in das Projekt ein. Er muss seine Unternehmensziele aus dieser verbleibenden Beeinflussbarkeit generieren und ist an einer Leistungserbringung mit möglichst geringem Aufwand (Minimalprinzip) und daher niedrigen Kosten interessiert. Umgekehrt ist es auch im Interesse des AG die Ausführungskosten – ohne Einbußen der geforderten Qualität – möglichst gering zu halten, um nicht die Finanzierbarkeit des Projekts zu gefährden. Der Bauvertrag und die dahinterstehende Kalkulation des AN stellen die wichtigsten Grundlagen für die Ausführung und Abrechnung dar. Es werden darin die Leistungen mit den entsprechenden Mengen und den zugehörigen Einheitspreisen (unter der Voraussetzung eines Einheitspreisvertrags) festgelegt. Diese Angaben beruhen teilweise auf sehr unsicheren Parametern, die einerseits auf Planungsungenauigkeiten und Fehlern in den Ausschreibungen, andererseits auf ungenauen Kalkulationen (Schätzungen, Heranziehung von subjektiven Erfahrungswerten), Kalkulationsirrtümern, falschen Annahmen und strategischen Überlegungen sowie die Wahl freier Kalkulationsannahmen (z.B. Kaliber- und Biegeformverteilung für Stabbehebung bei Ausschreibung einer Mischpreisposition) zurückzuführen sind.

Der Stand der Planung zum Zeitpunkt der Ausschreibung sowie die vorgegebene Bauzeit und die Zeit für die Angebotskalkulation<sup>15</sup> sind dabei wesent-

<sup>14</sup> Vgl. Volkmann (2003). Projektentwicklung für Architekten und Ingenieure. S. 115

<sup>15</sup> Vgl. Rockenschau/Benque/Weinhandl (2014). Reduzierung von Risiken durch ausgewogene Bauverträge bei Spitalsbauten. S. 49

liche Faktoren. Je genauer die Planung bzw. Ausschreibung (Leistungsbeschreibung) ist, desto genauer können die Bieter auch kalkulieren und desto eher sind die kalkulierten Preise auch realisierbar. Wird die Bauzeit zu kurz angesetzt, können die Firmen ihre Ressourcen nicht mehr optimal einsetzen und es kommt zu Kostensteigerungen gegenüber einer „normalen“ Bauzeit. Wird die Bauzeit zu lange angesetzt, fallen z.B. zusätzliche zeitabhängige Kosten sowie erhöhte Kosten aufgrund von Produktivitätsverlusten (z.B. nicht optimale Gruppengröße, nicht optimal ausgelastete Geräte, häufige Wechsel des Einsatzorts) an. Der qualitative Zusammenhang zwischen Bauzeit und Baukosten wird auf Basis von Literaturangaben in Abschnitt 4.3 dargestellt.

Jeder Bauherr hat nur ein gewisses Budget mit dem er seinen Bedarf gedeckt sehen will. Bei deterministischer Ermittlung der Kosten liegt nur ein Zahlenwert vor, der unter dem vorhandenen Projektbudget liegen sollte, um die Entscheidung für den Projektstart treffen zu können (siehe Abb. 4-6). Die Gegenüberstellung dieser einzelnen Zahlen lässt jedoch keine Aussagekraft über die Risiken und Chancen, die mit dem Projekt eingegangen werden, zu und bildet die Unsicherheiten bei der Ermittlung der Kosten nicht ab. Eine einzelne Zahl suggeriert, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser 100 % beträgt. Es wird eine Sicherheit vermittelt, die nicht vorhanden ist. Tatsächlich liegt die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser einen Zahl bei 0 %, da bereits eine geringfügige Abweichung der prognostizierten Kosten dazu führt, dass die ursprüngliche Vorhersage als falsch zu bezeichnen ist.

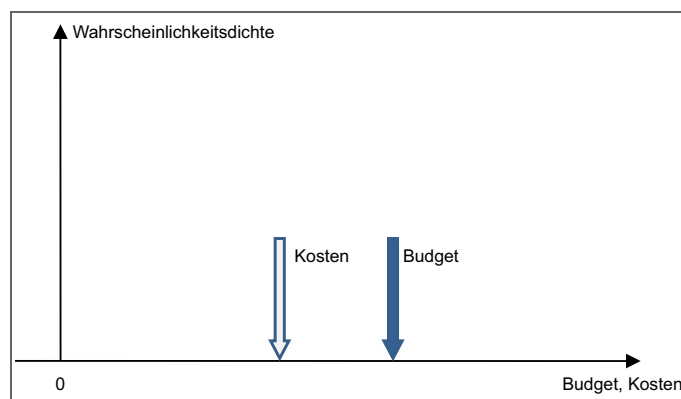
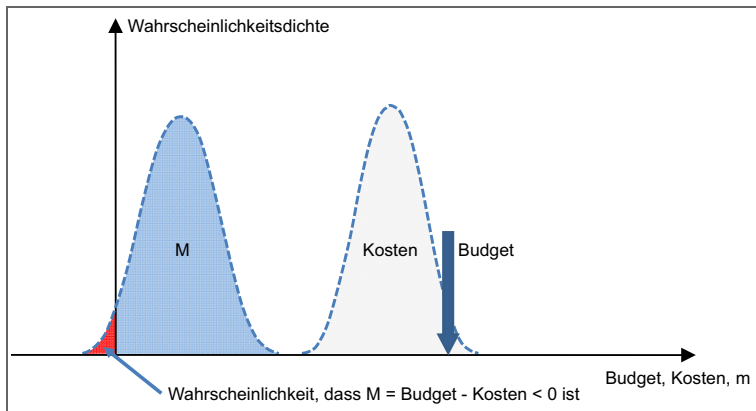


Abb. 4-6 Deterministische Kostenplanung – Budget > Kosten

Werden Bandbreiten in die Berechnungen integriert und die Kosten schlussendlich als Histogramm dargestellt, führt dies zu einer Erhöhung des Informationsgehalts und der Transparenz. Durch Subtraktion des Kostenhistogramms vom fix angenommenen Budget ergibt sich eine Verteilung für die Sicherheitsmarge  $M$ . Jener Bereich, der für  $M$  Werte kleiner als null liefert, wurde in Abb. 4-7 rot markiert. Die Fläche entspricht jener Wahrscheinlichkeit, mit der die Kosten das vorhandene Budget voraussichtlich übersteigen werden. Der Auftraggeber muss sich bei der Projektvorbereitung und besonders in der Planung dieser Unsicherheiten bewusst sein und hat durch den Einsatz von probabilistischen Berechnungsverfahren die Möglichkeit die Risiken und Chancen transparent darzustellen und je nach Risikopolitik bereits in einer frühen Projektphase steuernd einzugreifen (evtl. Änderung der Terminvorgaben, der geforderten Qualitäten etc.).



**Abb. 4-7** Probabilistische Kostenplanung – Budget > Kosten? – Sicherheitsmarge

Doch nicht nur AG, sondern auch Bieter bzw. spätere AN sind mit Unsicherheiten in ihren Kalkulationen konfrontiert. Unsicherheiten bei der Kosten- und Bauzeitermittlung sind daher nicht etwa in Fehlern bei den Berechnungen zu suchen, sondern sind in unterschiedlichen Einschätzungen des gleichen Sachverhalts durch unterschiedliche Akteure sowie im unvermeidbaren „Blick in die Zukunft“ begründet. Eine demonstrative Aufzählung von endogenen und exogenen Einflüssen auf die Baukalkulation ist in Tab. 4-1 dargestellt.<sup>16</sup>

Für den AN ist es von Interesse, welche Chancen bzw. Risiken er mit der Abgabe seines Angebots eingeht. Die Leistungserbringung auf der Baustelle stellt den wesentlichen Prozess bei der Abwicklung von Bauprojekten dar. Es gilt besonders die auszuführenden Tätigkeiten auf ihre Chancen und Risiken hin zu untersuchen, da diese die Zielerreichung direkt beeinflussen.

„Die risikobasierte, prozessorientierte Kostenkalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen muss den Leistungserstellungsprozess auf der Baustelle erfassen und in Kosten bewerten. Die Kalkulation ist somit einer der Kernprozesse im Rahmen der Leistungserstellungsprozesse und bildet das Bindeglied zwischen den Produktionsprozessen (Bauausführung) und Bewertungsprozessen des Rechnungswesens.“<sup>17</sup>

Bei der Abgabe der Angebote sind sich die Bauunternehmen oft nicht bewusst, welches Risiko sie eingehen. Die zentrale Frage, ob die den Preisen zugrunde liegenden Kosten in der Ausführung auch tatsächlich eingehalten werden können, bzw. wie wahrscheinlich dies ist, kann von den Bietern meist nicht beantwortet werden.

<sup>16</sup> Vgl. Liberda (1985). Ermittlung des Kalkulationswagnisses im Bauwesen durch stochastische Berechnung der Herstellkosten. S. 1

<sup>17</sup> Girmscheid/Motzko (2013). Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft – Produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung. S. 8

Einflüsse auf die Baukosten- und Bauzeitermittlung	
exogene Einflüsse	endogene Einflüsse
Witterung	Aufwandswerte
Verkehrsbehinderungen	Mittellohn
Mengenänderungen	Motivation der Mitarbeiter
Geologie	Fähigkeit der Bauleitung
Grundwasser	Umsatzverlauf
Planänderungen	Gewinnverlauf
Konkurs von Subunternehmern	Anteil des Stammpersonals
Detaillierung und Klarheit der Ausschreibung	Auslastung
Zins- und Inflationsentwicklung	Verhandlungsgeschick
Währungsentwicklung	Geräteverfügbarkeit
Art der Ausschreibung (konstruktiv oder funktional)	Disponiertheit (Gemütszustand des Kalkulanten)
Planvorlauf	Erfahrung
Verzögerungen/Unterbrechungen/Störungen	Organisationsstand der Firma
Naturkatastrophen (Erdbeben, Hochwasser etc.)	Qualität, Umfang und Aktualität der Nachkalkulationen
ÖBA	Vorbereitung
Allgemeine Preisentwicklung	Lokale Möglichkeit der Betoneinbringung
Verspäteter Baubeginn	Lage der Transportgeräte
Mischpreiskalkulationen	Einzusetzende Mannschaft
Bausparte	Dokumentation
Kriege	
Politische Unruhen	
Wirtschaftliche Sanktionen	
Leistungsänderungen	
Änderung der Umstände der Leistungserbringung	
Lohnkostenentwicklung	
Materialpreisentwicklung	
Baustellenorganisation	
Vorhandene Infrastruktur	
Art des AG (öffentlich, privat)	
Vertragsart	
Investitionserfordernisse	
Aktuelle Entwicklungen	
Zeit für die Kalkulation und Arbeitsvorbereitung	
Feingliedrigkeit des Baukörpers	
Lage der Baustelle	
Bewehrungsgrad	
Schalungsgrad	
Lagerflächen, Lagermöglichkeiten	
Bauwerksgeometrie	
Vorgegebene Bauzeit	
Pönalen	
Verfügbarkeit gut ausgebildeter Arbeitskräfte	
Anti-Claim-Management des AG	

Tab. 4-1 Einflüsse auf die Baukosten- und Bauzeitermittlung  
des AN – demonstrative Aufzählung

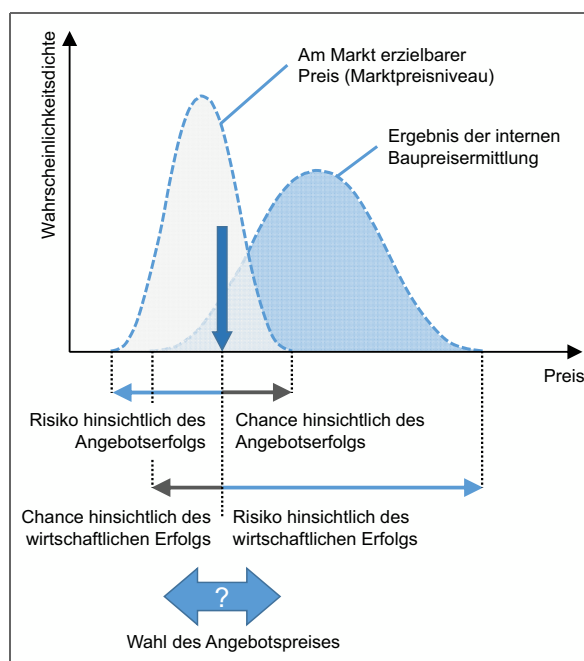
Es ist zwischen einer reinen kostenrechnerischen Kalkulation und einer im Wettbewerb durchgeführten Marktpreisbildung zu unterscheiden.<sup>18</sup> Die Basis für die Festlegung eines Marktpreises sollte jedoch immer eine fundierte Kostenkalkulation sein. Abhängig von der Risikofreudigkeit eines Unternehmens und der Höhe der Intention einen Auftrag unbedingt erhalten zu wollen, ergibt sich dann durch risikopolitische und strategische Überlegungen auf Unternehmensebene die Entscheidung für den angebotenen Preis.

<sup>18</sup> Vgl. Liberda (1985). Ermittlung des Kalkulationswagnisses im Bauwesen durch stochastische Berechnung der Herstellkosten, S. 2

Bauunternehmen sind sich bei ihrer Angebotslegung bzw. bei ihrer Preisbildung darüber im Klaren, dass ein Zusammenhang zwischen der Preisgestaltung und dem Angebotserfolg (Zuschlag/Beauftragung) herrscht. Ziel ist es, sich im Zuge der Angebotsabgabe durch die Nennung verbindlicher (auskömmlicher?) Preise mit einem besseren (nicht zwingend billigeren) Angebot gegen die Konkurrenz durchzusetzen. Je höher der Preis ist, desto geringer wird in weiterer Folge zwar das Risiko einen wirtschaftlichen Misserfolg zu erzielen, die Chance den Auftrag zu bekommen sinkt allerdings (Billigstbieterprinzip vorausgesetzt). Wird zu einem sehr niedrigen Preis angeboten, ist die Chance hoch den Auftrag zu erhalten, der wirtschaftliche Erfolg für dieses Projekt ist dagegen gefährdet.

Die Unternehmen wissen aus Marktbeobachtungen und eigenen Erfahrungen in der Regel, ob sie mit ihren abgegebenen Preisen eher im oberen oder unteren Bereich der erzielbaren Marktpreise liegen. Sie können jedoch nicht angeben, welche Risiken sie durch ihr Angebot eingehen oder wie hoch die wirtschaftliche Erfolgswahrscheinlichkeit bei den angebotenen Preisen ist.

Abb. 4-8 zeigt qualitativ diesen Zusammenhang und damit das Spannungsfeld in dem Bieter gezwungen sind ihre Preisbildung durchzuführen. Der vertikale Pfeil symbolisiert den Angebotspreis, der auch das Chancen-Risiko-Verhältnis sowohl für den Angebotserfolg als auch für den wirtschaftlichen Erfolg festlegt.



**Abb. 4-8** Wahl des Angebotspreises im Hinblick auf den wirtschaftlichen und den Angebotserfolg

In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Kostenermittlung und nicht auf die Preisbildung gerichtet. Die Kenntnis über die „Kostenwahrheit“ – unter Berücksichtigung vorhandener Unsicherheiten – bildet die Basis für die Preisbildung, bei der auch Überlegungen hinsichtlich der Vertragsgestaltung, Wettbewerbs- und Marktsituation, Unternehmensstrategie etc. einfließen.

Alle am Bau Beteiligten haben die Bestrebung, die zukünftigen Kosten möglichst genau zu kennen. Einerseits um eine entsprechende Finanzierung zu erbringen (AG), andererseits um das Chancen- und Risikopotential von Aufträgen abschätzen zu können (AN). Die Einbeziehung von Unsicherheiten in die Kostenprognose und Kalkulation ist daher für beide Vertragspartner von großem Interesse.

Sowohl AG als auch AN dienen probabilistische Berechnungen dazu, Entscheidungen aufgrund des aktuellen Wissensstands vorzubereiten. Dies kann auch zu einem Paradoxon führen: Werden falsche Entscheidungen getroffen, die in weiterer Folge zu Schäden führen, kann die Entscheidung trotzdem – aufgrund des ursprünglichen Wissensstands und der entsprechenden fundierten Einschätzung – richtig gewesen sein.<sup>19</sup> Man spricht in diesen Fällen von „unbekannten Unbekannten“, deren Eintreten und die damit verbundenen Auswirkungen nicht vorhergesehen werden konnten. Solche „schwarzen Schwäne“ werden im Zuge dieser Arbeit nicht behandelt.

#### 4.2 Prozessbasierte Ausführung

Die Erstellung eines Bauprojekts kann in Fertigungsprozesse mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden (z.B. Schalen, Bewehren, Betonieren) zerlegt werden, wobei jeder dieser Prozesse einen Baustein bzw. Puzzlestein des Gesamtprojekts darstellt. Essenziell ist, dass sich gewisse Prozesse in vielen verschiedenen Projekten wiederholen und auch unter ähnlichen Bedingungen ablaufen (siehe Abb. 4-9).

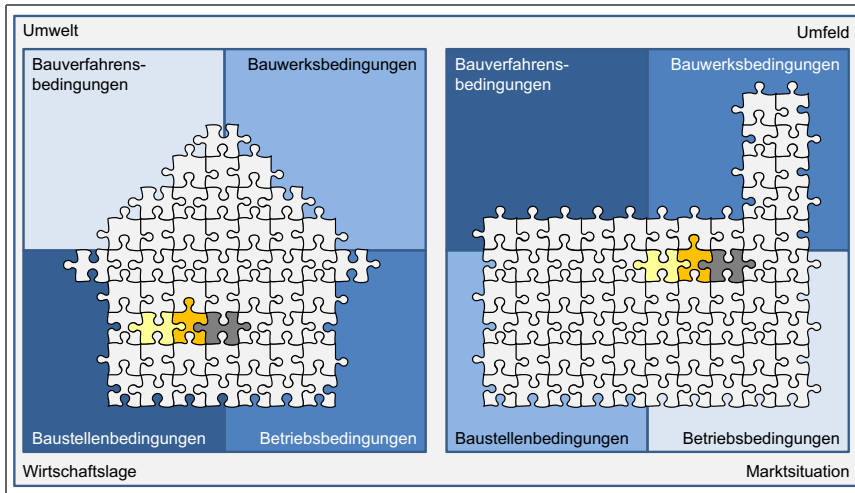
„Der Wiederholungsfaktor der einzelnen Geometrien und deren Ausprägung (Ausstattung) ist vernachlässigbar gering, aber die einzelnen Prozesse, die zur Herstellung dieser unterschiedlichen Geometrien und Ausstattungen führen, sind in der Regel Standardprozesse.“<sup>20</sup>

Das Schalen einer Wand kommt z.B. in unzähligen Projekten vor und kann als Standardprozess bezeichnet werden. Es ändern sich jedoch die Beteiligten (sowohl dispositive als auch operative Arbeitskräfte), die Geometrie, die Bauverfahrens-, Baustellen-, Bauwerks- und Betriebsbedingungen. Dadurch ergeben sich bei Bauprojekten, obwohl einzelne Prozesse immer wieder ähnlich sind, oft stark unterschiedliche Baukosten und Bauzeiten. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass im Zuge von Bauprojekten immer Prototypen hergestellt werden, bei denen sowohl der Herstellungsort als auch die ausführenden und planenden Teams von Projekt zu Projekt wechseln.

Diese Umstände erfordern es, dass auch vermeintlich wiederkehrende Arbeiten oder Prozesse für jedes Projekt neu – hinsichtlich des Aufwands und der Kosten – bewertet werden müssen.

<sup>19</sup> Vgl. Luhmann (1991). Soziologie des Risikos. S. 33

<sup>20</sup> Kessoudis (2010). Mefisto aus Sicht des Auftragnehmers – Modellbasierte Projektentwicklung im Bauunternehmen. S. 42



**Abb. 4-9** Schematische Darstellung gleicher bzw. ähnlicher Prozesse bzw. Prozessketten bei unterschiedlichen Bauprojekten mit veränderten Bauverfahrens-, Bauwerks-, Baustellen- und Betriebsbedingungen<sup>21</sup>

Um Chancen und Risiken in der Herstellung überhaupt quantitativ bewerten zu können, ist es erforderlich die Unsicherheiten in den jeweiligen Prozessen näher zu betrachten. Diese Unsicherheiten können vereinfacht und unsystematisch durch (Risiko-)Puffer (als prozentuelle Zuschläge) oder aber systematisch durch den Ansatz von Verteilungsfunktionen (anstelle von deterministischen Werten für die Inputgrößen) in den Berechnungen berücksichtigt werden.

Durch den Einsatz probabilistischer Verfahren können Aussagen über Bandbreiten und Wahrscheinlichkeiten sowie Entscheidungen unter Zugrundelegung eines definierten Chancen-Risiko-Verhältnisses getroffen werden.

Auf die Grundlagen der Monte-Carlo-Simulation sowie auf die Grundlagen der Anwendung wird in Kap. 5 eingegangen.

### 4.3 Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit

Die Materialeigenschaften von Baustoffen werden durch sogenannte Stoffgesetze quantitativ beschrieben. In den letzten Jahren wurde auch versucht, grundlegende Zusammenhänge im Baubetrieb und der Bauwirtschaft (zumindest qualitativ) zu beschreiben und mit Hilfe von Modellen abzubilden.

Einen wesentlichen Zusammenhang stellt dabei der Einfluss der vorgegebenen Bauzeit auf die Baukosten dar. Ausgewählte Ansätze aus der Literatur zu diesem Zusammenhang werden nachfolgend angeführt und diskutiert. Häufig wird ein nichtlinearer Verlauf der Baukosten bei Veränderung der Bauzeit gesehen.

<sup>21</sup> Vgl. Kummer/Hofstadler (2013), Einsatz der Monte-Carlo-Simulation zur Berechnung von Baukosten, S. 179

### Burkhardt/Pusch – 1960

Burkhardt/Pusch betrachten den qualitativen Verlauf der Gesamtkosten je Einheit in Abhängigkeit der Bauzeit (siehe Abb. 4-10). Die Gesamtkosten setzen sich dabei aus den Gemeinkosten, Installationskosten, Geschäftskosten (Bereitschaftskosten) und den Kosten der technischen Arbeit zusammen. Auffällig ist der markant nichtlineare Verlauf für die Installationskosten. Es handelt sich hierbei offenbar um die Kosten für die Installation von Geräten auf der Baustelle und es wird angenommen, dass sich diese je hergestellter Einheit verringern, je länger die Bauzeit andauert.

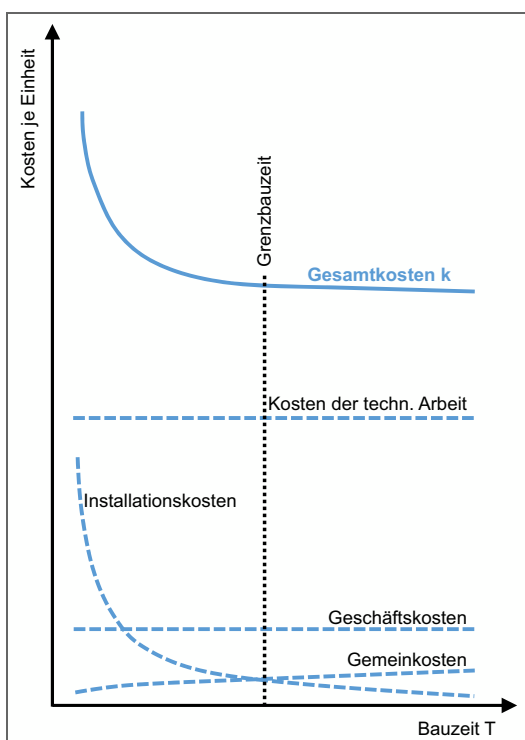


Abb. 4-10 Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit und Kosten je Einheit<sup>22</sup>

Weiters fällt auf, dass die Kosten für die technische Arbeit und für die Geschäftskosten konstant und demnach unabhängig von der Bauzeit angesetzt werden. Im Beitrag führen Burkhardt/Pusch<sup>23</sup> außerdem an, dass theoretisch auch die Gemeinkosten unbeeinflusst (also konstant) bleiben müssten, dass aber mit abnehmender Bauzeit eine gewisse Degression unterstellt wurde.

Es wird im Diagramm eine Grenzbauzeit angegeben, ab der eine weitere Bauzeiterhöhung keine nennenswerte Kostensenkung mehr mit sich bringt.<sup>24</sup> Ein Anstieg der Kosten bei zu langer Bauzeit wird nicht angegeben.

Die konstanten Kostenverläufe für einzelne Anteile der Gesamtkosten sind außerdem kritisch zu hinterfragen, da damit eine völlige Unabhängigkeit von

<sup>22</sup> Vgl. Burkhardt/Pusch (1960). Die Maschinisierung, ihr Maß und einige Konsequenzen für größere Baustellen. In: Neue Wege der Baubetriebsführung, S. 27

<sup>23</sup> Vgl. Burkhardt/Pusch (1960). Die Maschinisierung, ihr Maß und einige Konsequenzen für größere Baustellen. In: Neue Wege der Baubetriebsführung, S. 26

<sup>24</sup> Vgl. Burkhardt/Pusch (1960). Die Maschinisierung, ihr Maß und einige Konsequenzen für größere Baustellen. In: Neue Wege der Baubetriebsführung, S. 26



der vorgegebenen Bauzeit suggeriert wird. Besonders die Kosten der technischen Arbeit als unabhängig von der Bauzeit anzusetzen, erscheint im Hinblick auf zu erwartende Produktivitätsverluste sowohl bei zu kurzer als auch bei zu langer Bauzeit nicht nachvollziehbar.

### Burkhardt – 1963

Burkhardt überarbeitete den Ansatz aus 1960<sup>25</sup> und führt 1963<sup>26</sup> ein Diagramm an, in dem die Kosten je Mengeneinheit, das Potential und die Baugeschwindigkeit gemeinsam dargestellt sind (siehe Abb. 4-11). Auf der Abszisse ist die Bauzeit aufgetragen, wobei die minimale Bauzeit  $T_{\min}$  ganz rechts und die maximale Bauzeit  $T_{\max}$  ganz links im Diagramm aufgetragen sind. Diese Darstellungsform ist dahingehend nicht schlüssig, da im Diagrammursprung die Zeitachse mit  $T = 0$  beschriftet ist. Weiters werden auf der Abszisse keine direkten Angaben dazu gemacht, wie weit  $T_{\min}$  oder  $T_{\max}$  von der optimalen Bauzeit  $T_0$  entfernt liegen. Dies kann nur über die Baugeschwindigkeit  $v(T)$  abgelesen werden. Die minimale Bauzeit  $T_{\min}$  wird mit einer Steigerung der Baugeschwindigkeit um 60 % gleichgesetzt; die maximale Bauzeit  $T_{\max}$  resultiert in einer Geschwindigkeitsreduktion um 60 %.

Die Angaben auf der Ordinate stellen prozentuelle Abweichungen vom Optimalwert (100 %) dar und werden sehr genau angegeben. Es kann beispielsweise abgelesen werden, dass die Kosten je Mengeneinheit  $k(T)$  um 42 % ansteigen, wenn die Baugeschwindigkeit auf 20 % sinkt. Bei einer Verkürzung der Bauzeit bis auf  $T_{\min}$  wird eine geringere Kostenerhöhung (29 %) gesehen, als bei einer Erhöhung der Bauzeit bis zu einer Baugeschwindigkeit von 20 %. Weiters fällt auf, dass der Bereich der optimalen Bauzeit in einer sehr großen Bandbreite angegeben wird. Dieser optimale Bereich wird einerseits durch die Grenzbauzeit  $T_{\text{grenz}}$  – mit einer Baugeschwindigkeit von 120 % – andererseits durch die maximale Bauzeit  $T_{\max}$  – mit einer Baugeschwindigkeit von 40 % – angegeben. Die Baugeschwindigkeit kann also um insgesamt 80 % variieren, ohne dass wesentliche Einflüsse auf die Kosten zu erwarten wären. Der minimale Kostenwert wird bei  $T_{\max}$  mit 97 % erreicht.

Der Verlauf des Potentials – entspricht dem Einsatz der Produktionsfaktoren – steigt bei einer Verkürzung der Bauzeit unter  $T_0$  progressiv an und erreicht bei  $T_{\min}$  einen Wert von 240 %. Zwischen  $T_0$  und  $T_{\max}$  wird eine lineare Abnahme des Potentials vermutet. Aufgrund der beschränkten Teilbarkeit des Produktionsapparats verläuft das Potential bei einer Baugeschwindigkeit unter 40 % konstant.

<sup>25</sup> Vgl. Burkhardt/Pusch (1960). Die Maschinisierung, ihr Maß und einige Konsequenzen für größere Baustellen. In: Neue Wege der Baubetriebsführung, S. 26

<sup>26</sup> Vgl. Burkhardt (1963). Kostenprobleme der Bauproduktion, S. 83ff

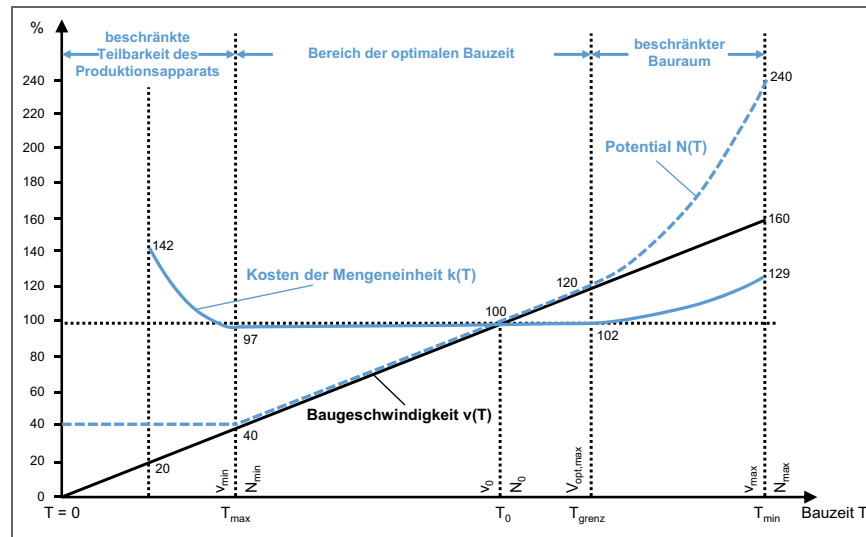


Abb. 4-11 Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit, Potential, Baugeschwindigkeit und Kosten je Einheit<sup>27</sup>

Wird beispielsweise die optimale Bauzeit für die Stahlbetonarbeiten eines Hochbauprojekts mit einer Betonmenge von ca. 38.000 m<sup>3</sup> mit 300 d angesetzt, ergibt sich eine durchschnittliche Leistung von 126,7 m<sup>3</sup>/d (= 38.000 m<sup>3</sup> / 300 d). Die Leistung kann auch als „Baugeschwindigkeit“ entsprechend Abb. 4-11 interpretiert werden. Die minimale Bauzeit T<sub>min</sub> würde sich demnach bei einer Leistung von 202,7 m<sup>3</sup>/d (= 126,7 m<sup>3</sup>/d · 1,6) und die maximale Bauzeit T<sub>max</sub> bei einer Leistung von 50,7 m<sup>3</sup>/d (= 126,7 m<sup>3</sup>/d · 0,4) ergeben. Durch Division der Betonmenge durch die berechneten Leistungswerte ergeben sich für dieses Beispiel die minimale und die maximale Bauzeit mit 187,5 d bzw. 750,0 d. Der Bereich der optimalen Bauzeit wäre für dieses Beispiel zwischen 250,0 d und 750,0 d anzugeben. Diese Bandbreite wird als äußerst groß erachtet.

Die Angaben von Burkhardt erscheinen, in Anbetracht der angegebenen Prozentwerte, teilweise nicht plausibel. In Abb. 4-11 zeigt sich bei einer Änderung der Bauzeitgeschwindigkeit um +/- 60 % einmal eine Kostenerhöhung um 29 % (Bauzeitverkürzung) und einmal eine Kostensenkung um 3 % (Bauzeitverlängerung). Die erhöhten Kosten bei einer Bauzeitverkürzung werden im Diagramm durch einen erhöhten Potentialeinsatz und einen beschränkten Bauraum begründet.

### Schubert – 1971

Schubert gibt den Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit mit Hilfe von drei qualitativen Kurven an (siehe Abb. 4-12). Es wird eine optimale Bauzeit definiert, bei der die Selbstkosten ein Minimum annehmen. Die Einzelkosten sinken mit einem Anstieg der Bauzeit. Die Gemeinkosten steigen, je länger die Bauzeit andauert. Alle drei Kurven weisen nichtlineare Verläufe auf und der Fokus liegt auf kurzen Bauzeiten (unter der optimalen Bauzeit). Ob die Selbstkosten bei einer zu kurzen oder zu langen Bauzeit höher ansteigen, kann aus Abb. 4-12 nicht zweifelsfrei abgelesen werden.

<sup>27</sup> Vgl. Burkhardt (1963), Kostenprobleme der Bauproduktion, S. 84

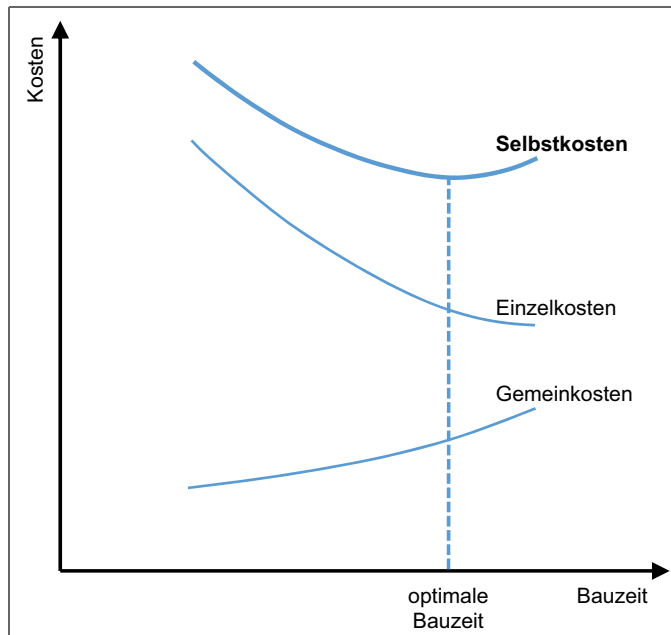


Abb. 4-12 Schematische Darstellung der möglichen Kostenentwicklung bei veränderlicher Bauzeit<sup>28</sup>

### Drees/Spranz – 1976

Drees/Spranz geben ebenfalls qualitativ einen günstigen Bereich für die Bauzeit an, in dem die Baukosten ein Minimum annehmen (siehe Abb. 4-13). Kommt es zu einer Unterschreitung der Bauzeit, wird der Kostenanstieg durch überhöhte Kapazität und unwirtschaftliches Arbeiten begründet. Bei zu langer Bauzeit wird der Kostenanstieg aufgrund der zeitabhängigen Kosten gesehen.

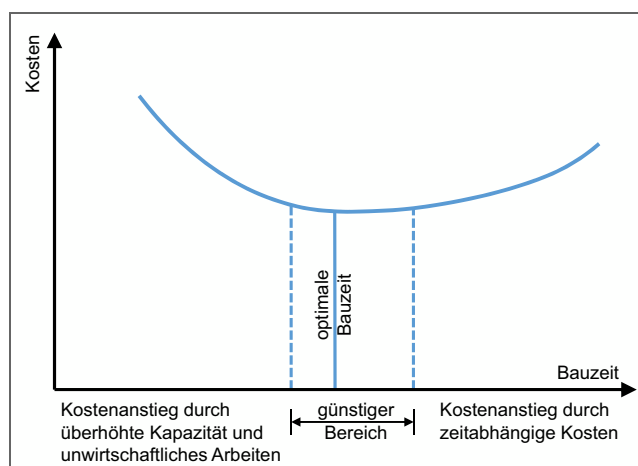


Abb. 4-13 Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit und Kosten<sup>29</sup>

<sup>28</sup> Vgl. Schubert (1971), Die Erfäßbarkeit des Risikos der Bauunternehmung bei Angebot und Abwicklung einer Baumaßnahme, S. 112

<sup>29</sup> Vgl. Drees/Spranz (1976), Handbuch der Arbeitsvorbereitung in Bauunternehmen, S. 154

Hier ist anzumerken, dass bei einer zu langen Bauzeit zusätzlich Effekte unwirtschaftlichen Arbeitens eine Kostenerhöhung verursachen können. Produktivitätsverluste sind sowohl bei zu kurzer als auch bei zu langer Bauzeit möglich.

Weiters wird von Drees/Spranz der Einfluss von Mehrschichtbetrieb und Überstunden in Zusammenhang mit der Bauzeit und den damit verbundenen Kosten angeführt (siehe Abb. 4-14). Wird die Bauzeit zu kurz angesetzt, werden Überstunden oder sogar ein Mehrschichtbetrieb erforderlich, was einen Anstieg der Kosten mit sich bringt.

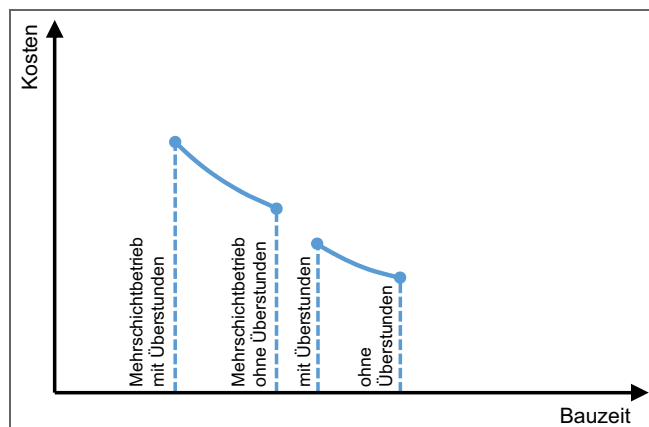


Abb. 4-14 Zeitkostenkurve einer Arbeit bei Überstunden und Mehrschichtbetrieb<sup>30</sup>

### Schmidt – 1977

Den Zusammenhang zwischen Baukosten, Kapazität und Bauzeit stellt Schmidt qualitativ in zwei Diagrammen dar (siehe Abb. 4-15). Durch den nichtlinearen Verlauf der Kosten in Abhängigkeit der Bauzeit, ist bei zu kurzer Bauzeit ein höherer Kostenanstieg erkennbar. Die Kapazitätsentwicklung über die Bauzeit wird durch drei Geraden mit unterschiedlichen Steigungen angegeben.

Sowohl bei Burkhard<sup>31</sup>, bei Drees/Spranz<sup>32</sup> als auch bei Schmidt<sup>33</sup> wird bei einer Verkürzung der Bauzeit das Problem eines beengten Arbeitsraums (Bauraums) für einen zusätzlichen Ressourcen- bzw. Kapazitätseinsatz gesehen.

Bei zu langer Bauzeit werden die Mehrkosten durch die Nichtteilbarkeit der Produktionsfaktoren und damit verbundene Leerkosten begründet.

<sup>30</sup> Vgl. Drees/Spranz (1976). Handbuch der Arbeitsvorbereitung in Bauunternehmen. S. 160

<sup>31</sup> Vgl. Burkhardt (1963). Kostenprobleme der Bauproduktion. S. 84

<sup>32</sup> Vgl. Drees/Spranz (1976). Handbuch der Arbeitsvorbereitung in Bauunternehmen. S. 154

<sup>33</sup> Vgl. Schmidt (1977). Grundlagen der Baubetriebslehre. S. 133

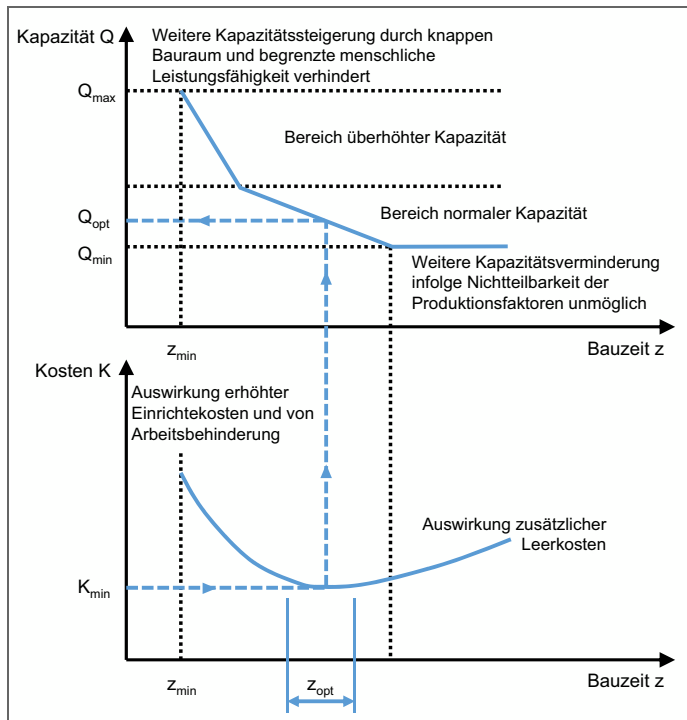


Abb. 4-15 Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit, Kapazität und Kosten<sup>34</sup>

### Kochendörfer – 1978

Zur Beschreibung des Optimierungspotentials zwischen Bauzeit und Baukosten gibt Kochendörfer einen qualitativen Kurvenverlauf für den Zusammenhang dieser beiden Größen an (siehe Abb. 4-16). Es wird dabei in indirekte Projektkosten und direkte Aktivitätskosten unterschieden. Die indirekten Projektkosten weisen einen progressiven Verlauf auf, der durch zeitgebundene Kosten begründet wird. Die direkten Aktivitätskosten steigen mit kürzer werdender Bauzeit aufgrund von „Beschleunigungskosten“ an.<sup>35</sup>

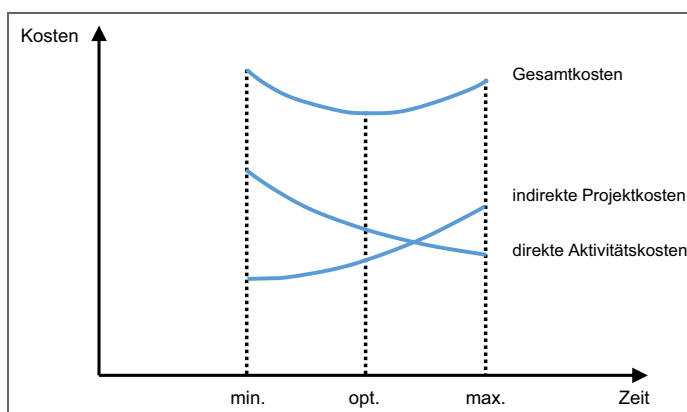


Abb. 4-16 Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit und Baukosten<sup>36</sup>

<sup>34</sup> Vgl. Schmidt (1977). Grundlagen der Baubetriebslehre. S. 133

<sup>35</sup> Vgl. Kochendörfer (1978). Bauzeit und Baukosten von Hochbauten. S. 36f

In einer zweiten Darstellung wird der Zusammenhang zwischen der Bauzeit und den Lohnkosten dargestellt (siehe Abb. 4-17). Es wird dabei mit kürzer werdender Bauzeit in einen Bereich mit und einen Bereich ohne Leistungsabfall unterschieden. Der Kostenanstieg wird durch das Erfordernis von Überstunden oder durch Arbeit im Mehrschichtbetrieb begründet. Von Kochendörfer wird außerdem angegeben, dass bei Zunahme der Anzahl an Überstunden ein Leistungsabfall verursacht wird, der zu einem überproportionalen Anstieg der Lohnkosten führt. Es wird vorgeschlagen, den nichtlinearen Verlauf durch eine stückweise Linearisierung zu vereinfachen.<sup>37</sup>

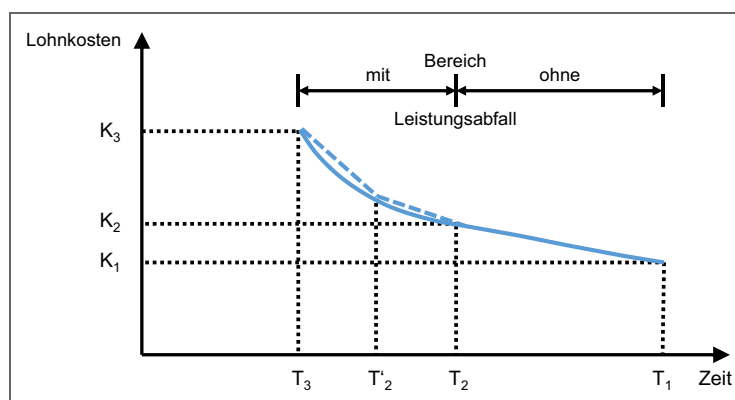


Abb. 4-17 Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit und Lohnkosten<sup>38</sup>

### Oberndorfer – 2010

Oberndorfer gibt in seiner Abbildung an, dass sich die Kapazität und damit der Einsatz der Produktionsfaktoren bei unterschiedlichen Bauzeiten nicht-linear verhält und, dass bei einer gewissen Bauzeit ein Minimum der Baukosten erreicht werden kann. Die Gesamtkosten setzen sich aus den einmaligen Kosten, den zeitabhängigen Kosten und den betriebsabhängigen Kosten zusammen. Einmalige Kosten können z.B. der An- und Abtransport eines Krans auf eine Baustelle darstellen. Die zeitabhängigen Kosten weisen über die Zeit einen linearen Verlauf auf, da es sich dabei um Kostenkomponenten je Zeiteinheit handelt. Ein Kran oder auch die Miete von Schalungselementen wird unabhängig davon, wie oft diese eingesetzt werden, nach Zeiteinheiten verrechnet (Abnutzungen und Reparaturen sind hier nicht berücksichtigt). Die betriebsabhängigen Kosten, also jene Kosten, die im Zuge der Leistungserbringung durch die Kombination der Produktionsfaktoren entstehen, haben einen wesentlichen nichtlinearen Verlauf, der in Abb. 4-18 durch die Kurve für die Gesamtkosten dargestellt ist. Eine zu kurze Bauzeit verursacht einen größeren Anstieg der Baukosten als eine zu lange.

Auch Oberndorfer sieht bei einer Bauzeitverlängerung einen auslaufenden Ast der Kapazitätskurve, die sich asymptotisch einer Mindestkapazität annähert.

<sup>36</sup> Vgl. Kochendörfer (1978). Bauzeit und Baukosten von Hochbauten. S. 37

<sup>37</sup> Vgl. Kochendörfer (1978). Bauzeit und Baukosten von Hochbauten. S. 87

<sup>38</sup> Vgl. Kochendörfer (1978). Bauzeit und Baukosten von Hochbauten. S. 87

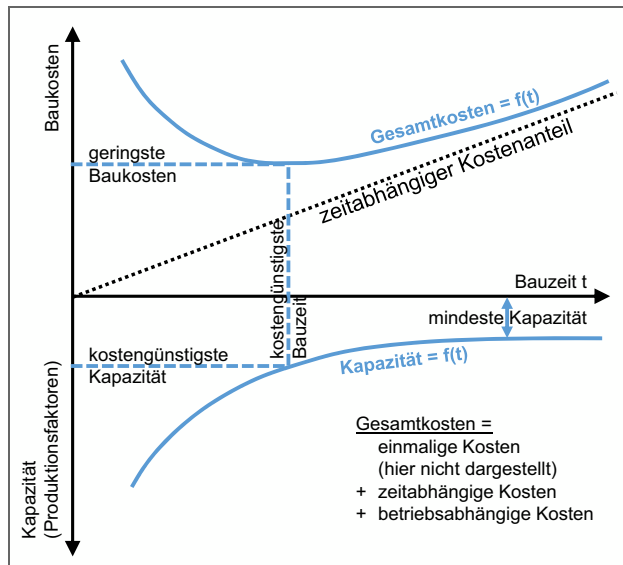


Abb. 4-18 Qualitativer Zusammenhang von Kapazität, Bauzeit und Baukosten<sup>39</sup>

### Hürlimann/Bucher – 2010

Von Hürlimann/Bucher wird ebenfalls qualitativ ein Bereich für die Bauzeit angegeben, in dem die Kosten minimal sind. Eine Bauzeit, die sich nur geringfügig von dieser optimalen Dauer unterscheidet, wird nur zu einer moderaten Kostensteigerung führen. Bei einer zu großen Bauzeitverkürzung sind auch sprunghafte Kostenanstiege möglich (siehe Abb. 4-19). Begründet wird dieser sprunghafte Anstieg z.B. durch die Notwendigkeit eines Mehrschichtbetriebs bei stark verkürzter Bauzeit.<sup>40</sup>

Der Kurvenverlauf wird durch eine minimale Bauzeit begrenzt. Werden noch kürzere Bauzeiten vereinbart, ist die Ausführung zu der geforderten Qualität nicht mehr möglich (grau schraffierter Bereich in Abb. 4-19). Hürlimann/Bucher geben weiters an, dass in seltenen Fällen, bei denen die vorgegebene Ausführungsfrist über der Optimaldauer liegt, der AN dann nicht mit höheren Kosten rechnen muss, wenn er die Arbeiten zeitlich vor dem vereinbarten Zwischen- oder Endtermin abschließen darf (d.h. der AN darf den Fertigstellungstermin selbst wählen).<sup>41</sup>

Hinsichtlich des Vertragspreises wird angegeben, dass die Kosten für eine von der Optimaldauer abweichende Bauzeit in diesem enthalten sind.<sup>42</sup>

Dies trifft nur dann zu, wenn der AN bzw. der Bieter bereits zum Zeitpunkt der Angebotslegung die Abweichung von der optimalen Bauzeit erkannt und die Auswirkungen dementsprechend in seiner Kalkulation berücksichtigt hat.

<sup>39</sup> Vgl. Oberndorfer (2010). Ein Beitrag zu den Grundlagen der Baupreisbildung. S. 192

<sup>40</sup> Vgl. Hürlimann/Bucher (2010). Bauzeit und Bauablauf im schweizerischen Baurecht. S. 10f

<sup>41</sup> Vgl. Hürlimann/Bucher (2010). Bauzeit und Bauablauf im schweizerischen Baurecht. S. 11

<sup>42</sup> Vgl. Hürlimann/Bucher (2010). Bauzeit und Bauablauf im schweizerischen Baurecht. S. 11

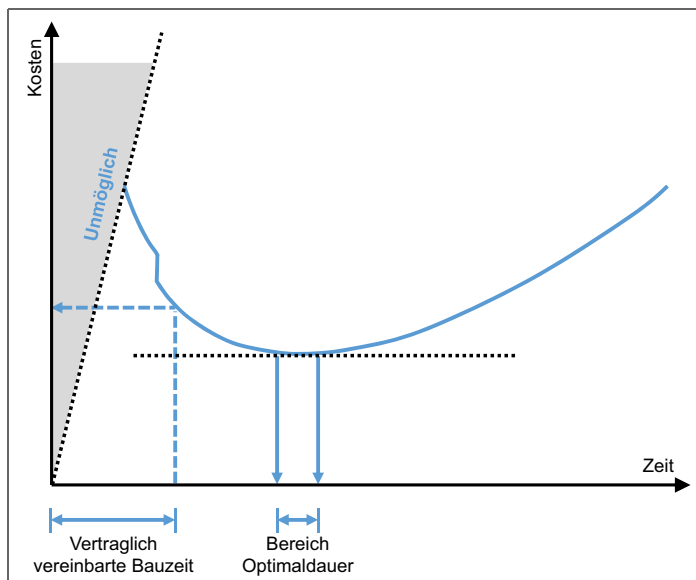


Abb. 4-19 Qualitativer Zusammenhang von Bauzeit und -kosten<sup>43</sup>

#### Wolkerstorfer/Lang – 2014

Für eine Leistungsposition geben Wolkerstorfer/Lang qualitativ den Zusammenhang zwischen der Zeit bzw. der Menge und den Kosten grafisch an (siehe Abb. 4-20). Für den Kurvenverlauf wird dabei eine optimale Kombination der Produktionsfaktoren (Arbeit, Betriebsmittel und Stoffe) vorausgesetzt. Bei den Abweichungen von der optimalen Bauzeit bzw. Menge wird in einen endogenen Bereich (ca. +/- 5 % der täglichen Leistung) und einen exogenen Bereich (Abweichungen vom Vertrag, die der Sphäre des AG zuzuordnen sind) unterschieden. Die vereinbarte Bauzeit bzw. die vereinbarten Mengen werden dabei als „Konstanten“ und der Ressourceneinsatz (der auf mögliche Änderungen der Konstanten reagieren muss) als „Variablen“ bezeichnet.<sup>44</sup>

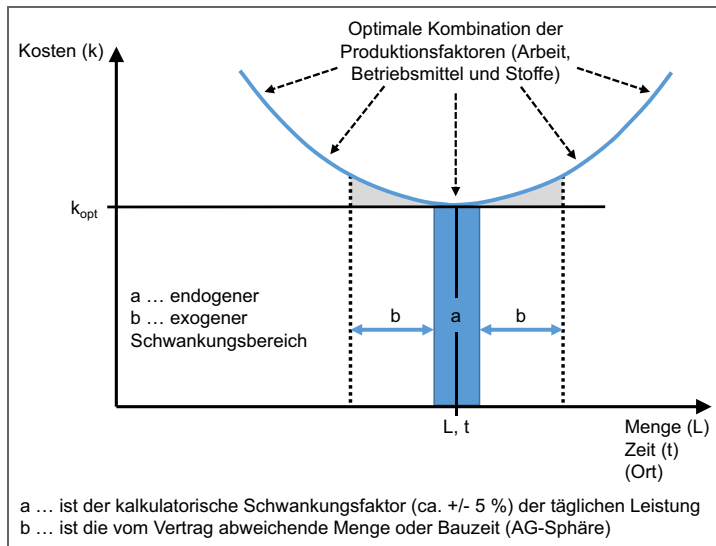
Aus der Darstellung ist nicht ersichtlich, welche Auswirkungen eine nichtoptimale Kombination der Produktionsfaktoren auf den Kostenverlauf hat. Hier müsste es zu einem noch deutlicheren Anstieg der Kosten links und rechts des Kostenoptimums kommen.

In der Abbildung wird auch nicht zwischen zu kurzer und zu langer Bauzeit bzw. Mengenerhöhung und Mengensenkung unterschieden. Es werden hier von Wolkerstorfer/Lang gleiche Auswirkungen auf die Kosten vermutet.

<sup>43</sup> Vgl. Hürlimann/Bucher (2010). Bauzeit und Bauablauf im schweizerischen Baurecht. S. 11

<sup>44</sup> Vgl. Wolkerstorfer/Lang (2014). Praktische Baukalkulation – Erstellen der Kalkulationsformblätter gemäß ÖNORM B 2061. S. 221f





**Abb. 4-20** Qualitativer Zusammenhang zwischen der Menge bzw. der Bauzeit und der Kosten für eine Leistungsposition<sup>45</sup>

#### Hofstadler – 2014

Hofstadler hält fest, dass der Bauherr durch die Vorgabe der Bauzeit wesentlichen Einfluss auf die Kosten und damit auch auf die Baupreise ausübt, wenn von den Bietern erkennbare Produktivitätsverluste in der Kalkulation berücksichtigt werden. Zu kurze Bauzeiten führen zu Produktivitätsverlusten und damit zu höheren Kosten. Die Grenzen für Produktivitätsverluste sind teilweise noch nicht durchgängig bekannt oder umstritten.<sup>46</sup>

Der qualitative Zusammenhang zwischen der Bauzeit, den Herstellkosten und der Produktivität sind in Abb. 4-21 dargestellt. Es sind nichtlineare Verläufe sowohl für die Kosten als auch für die Produktivität erkennbar und es wird ein enger Bereich für die normale Bauzeit definiert, in dem die Kosten ein Minimum und die Produktivität ein Maximum erreichen. Weiters ist durch ein Histogramm die Unsicherheit, die mit der ex ante Ermittlung der Bauzeit verbunden ist, symbolisiert. Es wird grundsätzlich für eine Bauzeitverkürzung ein größerer Anstieg der Kosten erwartet als bei einer Bauzeitverlängerung. Ab einem – nicht näher definierten Punkt – ist eine weitere Verkürzung der Bauzeit nicht mehr möglich („No-go-Kriterium“).

<sup>45</sup> Vgl. Wolkerstorfer/Lang (2014). Praktische Baukalkulation – Erstellen der Kalkulationsformblätter gemäß ONORM B 2061. S. 222

<sup>46</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 55

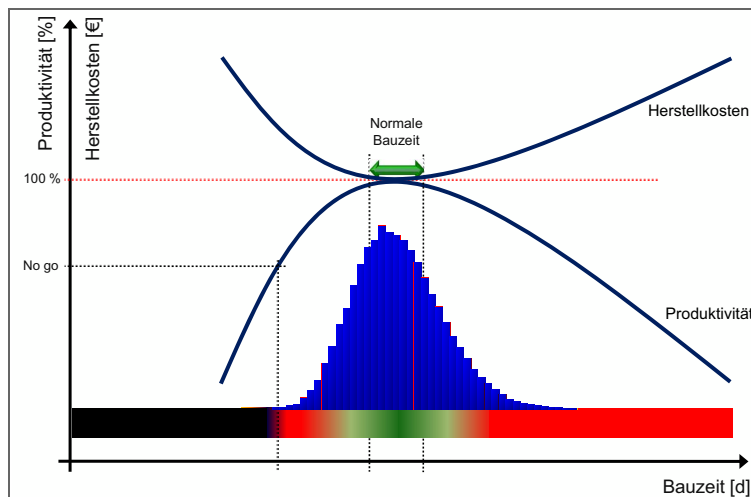


Abb. 4-21 Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit, Produktivität und Herstellkosten<sup>47</sup>

Der Kostenanstieg bei zu langer Bauzeit wird nicht nur durch den Einfluss der zeitgebundenen Kosten (Baustellengemeinkosten), sondern auch durch einen leistungsbezogenen Kostenanstieg begründet. Bei zu langer Bauzeit lassen sich die Arbeitskräfte länger für bestimmte Tätigkeiten Zeit. Die Arbeit dauert so lange, wie sie dauern muss, da der entsprechende Termindruck nicht vorhanden ist. Dies führt ebenfalls zu einer Verringerung der erzielten Produktivität.<sup>48</sup>

#### 4.4 Bauzeit

Unter Bauzeit wird in dieser Arbeit die vom AG vorgegebene Zeit für die Durchführung der Stahlbetonarbeiten verstanden.

Es erfolgt eine Differenzierung der Bauzeiten in:

- „Extrem kurze Bauzeit

Die Bauzeit wird so festgelegt, dass die Anzahl der Arbeitskräfte und die Anzahl der Geräte, welche produktiv eingesetzt werden sollen, die jeweiligen Maximalwerte (= Grenzen zu Produktivitätsverlusten) um 20 % überschreiten.

- Sehr kurze Bauzeit

Die Bauzeit wird so festgelegt, dass die Anzahl der Arbeitskräfte und die Anzahl der Geräte, welche produktiv eingesetzt werden sollen, die jeweiligen Maximalwerte um 10 % überschreiten.

- Kurze Bauzeit

Die Bauzeit wird so festgelegt, dass die Anzahl der Arbeitskräfte und die Anzahl der Geräte, welche produktiv eingesetzt werden sollen, die jeweiligen Maximalwerte darstellen. Eine Bauablaufstörung kann bei Festhaltung am Bauzeitziel unmittelbar zu Produktivitätsverlusten führen.

<sup>47</sup> Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. S. 60

<sup>48</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 39ff

- Normale Bauzeit

Die Bauzeit wird so festgelegt, dass die Anzahl der Arbeitskräfte und die Anzahl der Geräte, welche produktiv eingesetzt werden sollen, die jeweiligen Maximalwerte um 10 % unterschreiten.

- Lange Bauzeit

Die Bauzeit wird so festgelegt, dass die Anzahl der Arbeitskräfte und die Anzahl der Geräte, welche produktiv eingesetzt werden sollen, die jeweiligen Maximalwerte um 25 % unterschreiten.<sup>49</sup>

Dieser Zusammenhang zwischen der Anzahl an Geräten und den produktiv einsetzbaren Arbeitskräften wird in einem Beispiel für den Kranproportionalitätsfaktor (Anzahl der durch einen Kran bedienbaren Anzahl an Arbeitskräften) veranschaulicht. Der Kranproportionalitätsfaktor hängt im Hochbau wesentlich vom Betonierverfahren ab. Je mehr Bauteile mit Kran und Krankübel betoniert werden, desto weniger Arbeitskräfte können durch einen Kran bedient werden (siehe Tab. 4-2).

Betonierverfahren [-]	alle Bauteile mit Kran und Krankübel	nur Wände und Stützen mit Kran	nur Stützen mit Kran	ohne Kran
Anzahl der Arbeitskräfte je Obendreher-Kran	13	16	18	20

Tab. 4-2 Kranproportionalitätsfaktoren – Maximale Anzahl an Arbeitskräften je Kran beim Einsatz eines Obendreher-Krans<sup>50</sup>

In Abb. 4-22 wird die bedienbare Anzahl an Arbeitskräften je Kran der Bauzeit gegenübergestellt. Für den Maximalwert wurde angenommen, dass ohne Krane betoniert wird (= 20 AK/Kran). Zur Berechnung der normalen Bauzeit, muss dieser Maximalwert lt. Definition um 10 % auf 18 AK/Kran (= 20 AK/Kran · 0,90) abgemindert werden.<sup>51</sup>

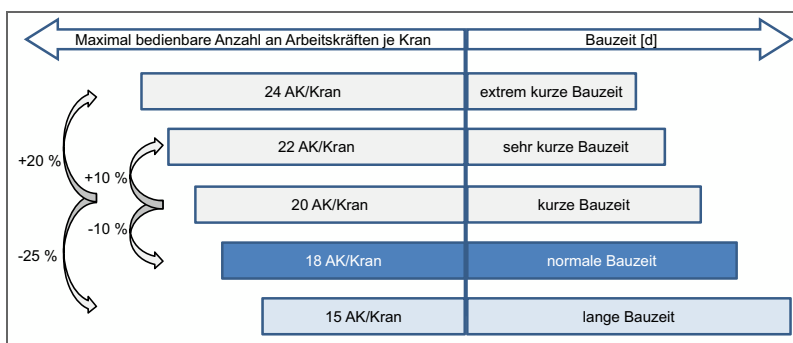


Abb. 4-22 Zusammenhang zwischen dem Kranproportionalitätsfaktor und der Bauzeit<sup>52</sup>

Mit diesem Kranproportionalitätsfaktor kann in weiterer Folge über die Anzahl der einsetzbaren Krane die maximale Anzahl an Arbeitskräften und unter Berücksichtigung des Arbeitskräfteverhältnisses<sup>53</sup> auch die mittlere Anzahl

<sup>49</sup> Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 57

<sup>50</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 231

<sup>51</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. S. 62

<sup>52</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. S. 62

der Arbeitskräfte ermittelt werden. Durch die Wahl der täglichen Arbeitszeit, und des Grund-Gesamt-Aufwands werts lässt sich die durchschnittliche tägliche Leistung und in weiterer Folge durch die zu errichtende Stahlbetonmenge, die normale Bauzeit für die Stahlbetonarbeiten ermitteln. Weicht die vom AG vorgegebene Bauzeit von dieser normalen Bauzeit ab, liegt eine zu kurze oder zu lange Bauzeit vor und es ist mit Produktivitätsverlusten zu rechnen.<sup>54</sup>

**4.5 Gründe für eine nicht normale Bauzeit**

Bieter und spätere AN müssen in ihren Angebotskalkulationen und Preisbildungen die vorgegebene Bauzeit monetär berücksichtigen. Gibt der AG in der Ausschreibung eine normale Bauzeit vor, sind die Voraussetzungen gegeben, dass der AN seine Ressourcen normal einsetzen kann und die minimalen Kosten erreicht werden.

Die vorgegebene Bauzeit kann sich aufgrund bestimmter Umstände (siehe Abb. 4-23) aber auch erst während der Ausführung als zu kurz bzw. zu lang erweisen. Kommt es beispielsweise zu massiven Mengenänderungen, muss die tägliche Leistung und damit der Ressourceneinsatz entsprechend angepasst werden. Als Folge kann es zu Produktivitätsverlusten und damit zu Kostensteigerungen kommen.

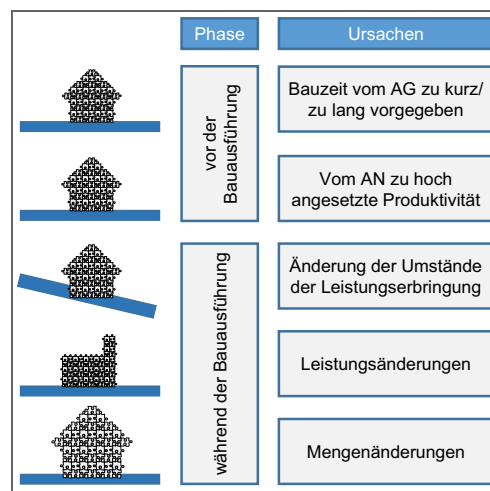


Abb. 4-23 Gründe für eine nicht normale Bauzeit

Weiters können sich Änderungen der Umstände der Leistungserbringung sowie Leistungsänderungen auf die benötigte Bauzeit auswirken und eine ursprünglich als „normal“ erachtete Bauzeit kann sich als zu kurz oder zu lang erweisen. Ähnlich verhält es sich auch, wenn die Produktivität bzw. der Aufwand für eine Leistung vom AN zu hoch oder zu niedrig angenommen wurde (z.B. durch ein vorher nicht bekanntes Nachtbauverbot oder unübliche Witterungsverhältnisse) und sich in der Ausführung zeigt, dass mit höherer

<sup>53</sup> Das Arbeitskräfteverhältnis ist ein Faktor, der das Verhältnis zwischen der mittleren und der maximalen Anzahl an eingesetzten Arbeitskräften über die Bauzeit angibt. Es wird dabei ein Trapezmodell mit einer Anlauf-, Hauptbau- und einer Auslaufphase vorausgesetzt.

<sup>54</sup> Detailliertes Berechnungsbeispiel für die Addition von Produktivitätsverlusten infolge einer zu kurzen Bauzeit, siehe: Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. S. 75ff

oder niedrigerer Produktivität gearbeitet werden kann. Auch in diesem Fall müssen die Ressourcen während der Ausführung entsprechend angepasst werden und es können Produktivitätsverluste auftreten.

Mengenverschiebungen (z.B. innerhalb der Stahlbetonarbeiten) können dazu führen, dass das Gefüge der Leistungen nicht mehr jenem der Ausschreibung entspricht. Beispielsweise kann sich das Verhältnis zwischen Bewehrungsmenge und Betonmenge oder zwischen Schalungsfläche und Betonmenge derart ändern, dass damit auch eine wesentliche Änderung des Schalungs- und Bewehrungsgrads zustande kommt und sich der Aufwand für die Leistungserbringung gegenüber ursprünglichen Ansätzen ändert.

Weitere Gründe, die während der Ausführung zu einer nicht normalen Bauzeit führen können sind beispielsweise der Wegfall von Leistungen, die Verschiebung von Fristen oder auch die Änderung von Qualitätsstandards.<sup>55</sup>

## 4.6 Kostenverläufe

Grundsätzlich kann bei der Kostenstruktur in fixe und variable Kosten unterschieden werden. Weiters kann bei den variablen Kosten in lineare und nicht-lineare Verläufe unterschieden werden. In Abb. 4-24 sind mögliche Kostenverläufe als Baumstruktur dargestellt. Im unteren Bereich der Abb. 4-24 sind auch qualitative Skizzen für die Kostenverläufe angeführt. Auf der Ordinate sind jeweils die Kosten und auf der Abszisse die jeweilige Kosteneinflussgröße aufgetragen. Nachfolgend werden kurze Beispiele für die einzelnen Kostenstrukturen angeführt.

Bei den fixen Kostenverläufen ist zwischen absolut fixen und intervallweise fixen Kostenverläufen zu differenzieren. Ein Beispiel für fixe Kosten wären etwa die Kosten für den Aufbau sowie den An- und Abtransport eines Krans. Hier fallen Kosten unabhängig davon an, ob eine Leistung mit dem Kran erbracht wird oder nicht. Wird die Anzahl der Krane erhöht, ergeben sich für jeden der Krane entsprechende fixe Kosten, die Gesamtkosten für die Installation der Krane auf der Baustelle steigen mit jedem weiteren Kran und es kommt zu einem intervallweise fixen Verlauf der Kosten.

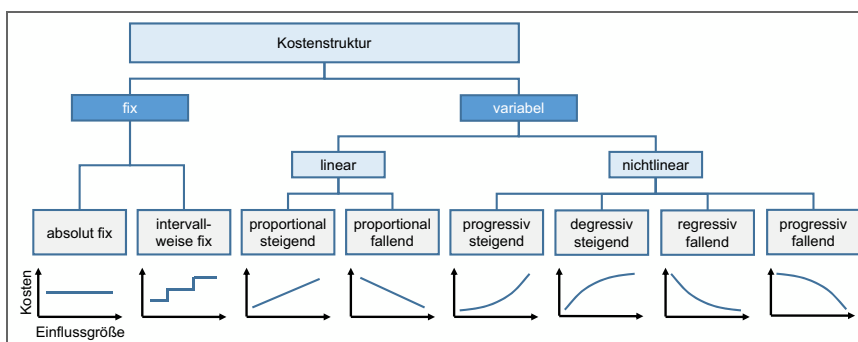


Abb. 4-24 Kostenstruktur<sup>56</sup>

<sup>55</sup> Vgl. Girmscheid/Motzko (2013). Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft – Produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung. S. 120ff

<sup>56</sup> In Anlehnung an: Girmscheid/Motzko (2013). Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft – Produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung. S. 141

Proportional steigende Kostenverläufe ergeben sich beispielsweise bei zeitabhängigen Kosten. Je länger die Bauzeit andauert, desto höher werden z.B. die Kosten für Containermieten. Ein proportional fallender Kostenverlauf würde z.B. dann auftreten, wenn die einmaligen Kosten der Baustelleneinrichtung auf die Dauer der Bauzeit umgelegt werden. Je länger die Bauzeit andauert, desto geringer sind dann die anteiligen Kosten der Baustelleneinrichtung pro Monat.

Lineare Kostenverläufe werden oft als Vereinfachung angesetzt. Es muss aber überprüft werden, ob diese Vereinfachungen überhaupt zulässig und welche Fehler damit verbunden sind.

Nichtlineare Kostenverläufe treten häufig auf und können prinzipiell in steigende und fallende Verläufe unterschieden werden. Ein progressiv steigender Verlauf tritt z.B. bei den Lohnkosten dann auf, wenn Überstundenzuschläge bezahlt werden müssen oder aufgrund von Produktivitätsverlusten mehr Lohnstunden anfallen als dies bei einem normalen Einsatz der Produktionsfaktoren der Fall gewesen wäre. Degressiv steigende Kosten können beispielsweise bei den Lohnkosten infolge eines Einarbeitungseffekts entstehen.<sup>57</sup>

Ein regressiv fallender Kostenverlauf ergibt sich beispielsweise für die Kosten je Mengeneinheit wenn ein Mengenrabatt vorliegt. Die Kosten je Einheit werden dann geringer, je größer die bestellte Menge ist.

Progressiv fallende Kostenverläufe kommen äußerst selten vor und wurden nur der Vollständigkeit halber in Abb. 4-24 angeführt.

Weiters gibt es auch noch die Möglichkeit von Kurvenverläufen, die sich intervallweise aus den Grundformen der Kostenverläufe in Abb. 4-24 zusammensetzen. Die Verläufe können auch Unstetigkeiten (Sprünge/Stufen) enthalten, wenn bestimmte Grenzwerte über- oder unterschritten werden.

#### 4.7 Einfluss von Nichtlinearitäten

Generell gilt, dass sich Fehler in den Eingangsgrößen bei linearen Systemen weniger stark auswirken, als dies bei nichtlinearen Systemen oder bei dynamischen Prozessen der Fall ist.

Ein Beispiel soll diesen Sachverhalt verdeutlichen:<sup>58</sup>

Angenommen es soll die Summe aus  $5 + 5$  gebildet werden, eine der Eingangsgrößen ist aber mit Unsicherheiten behaftet und es könnte genauso ein Wert von 4 oder 6 eintreten. Die Summe könnte damit entweder 9, 10 oder 11 sein. Der Fehler bzw. der Unterschied zwischen den Ergebnissen ist für dieses lineare System im Vergleich zu einem nichtlinearen System nicht wirklich groß.

Man stelle sich vor, es soll die dritte Potenz von 5 gebildet werden (also  $5^3$ ). Das Ergebnis von  $5^3$  ist 125. Kann die Inputgröße aber statt 5 auch noch die Werte 4 und 6 annehmen, liegt die Bandbreite der Ergebnisse zwischen 64 und 216. Die Auswirkungen eines unsicheren Inputs sind wesentlich größer. Noch markanter wird der Unterschied, wenn nicht die Basis (hier: 5) sondern

<sup>57</sup> Vgl. Girmscheid/Motzko (2013). Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft – Produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung. S. 143

<sup>58</sup> Ähnliches Beispiel in Silver (2013). Die Berechnung der Zukunft. S. 154

der Exponent unsicher ist. Es wird angenommen, dass der Exponent die Werte 2, 3 und 4 annehmen kann. Die Ergebnisse können dann folgende Werte annehmen: 25; 125 und 625.

Eine deutliche Fortpflanzung dieses Effekts tritt dann auf, wenn es sich um dynamische Prozesse handelt und die Ergebnisse einer Berechnung wieder als Eingangsgrößen für einen nächsten Berechnungsschritt dienen.

Diese einfachen Überlegungen zeigen, dass die Auswirkungen von Unsicherheiten bei nichtlinearen Systemen wesentlich gravierender sein können, als bei linearen. Eine Linearisierung von nichtlinearen Zusammenhängen muss daher immer auch in Hinblick auf mögliche Fehler aufgrund von unsicheren Eingangsparametern überprüft werden. Eine Kombination aus linearer Berechnungsvorschrift mit deterministischen Inputs kann daher zu falschen Ergebnissen und Entscheidungen führen.

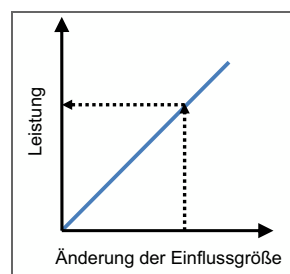
#### 4.8 Verschiedene Zusammenhänge zwischen Variablen

Um komplexe Zusammenhänge überhaupt erfassen zu können erfolgt die Abbildung der Realität mit Hilfe von Modellen. Im Zuge der Modellierung sind Vereinfachungen und Annahmen zu treffen, die sich direkt auf die Validität<sup>59</sup> des Modells auswirken. Bei der Modellierung werden oft nichtlineare Zusammenhänge als linear angenommen oder deterministische Berechnungen durchgeführt, obwohl die einzelnen Prozesse mit Unsicherheiten behaftet sind und eigentlich eine probabilistische Betrachtung erfordern würden.

Die folgende Differenzierung in unterschiedliche Typen bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen der Änderung der Einflussgröße (z.B. Anzahl der eingesetzten Arbeitskräfte) und der damit direkt in Zusammenhang stehenden, erzielbaren Leistung bzw. dem Zusammenhang zwischen der Änderung der Einflussgrößen und dem Aufwandswert oder der Aufwandswertenerhöhung.

##### Typ 1

Besteht wie in Abb. 4-25 ein linearer Zusammenhang zwischen dem Input (in diesem Fall die Änderung der Einflussgröße) und dem Output (hier: Leistung), kann direkt von einem Wert auf den anderen geschlossen werden (und umgekehrt). Beim Typ 1 handelt es sich um den einfachsten Zusammenhang zwischen zwei Variablen.

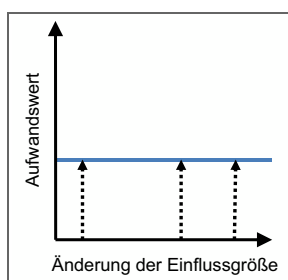


**Abb. 4-25** Linearer Zusammenhang zwischen Input und Output – deterministische Betrachtung – Typ 1<sup>60</sup>

<sup>59</sup> „Validität“ beschreibt die Gültigkeit bzw. Belastbarkeit einer Annahme. Nur mit einem validen Modell können Aussagen über zukünftige Ereignisse getroffen werden.

Lineare Zusammenhänge kommen in der Natur nur sehr selten vor und auch bei baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Themen handelt es sich dabei meist um Spezialfälle oder starke Vereinfachungen eines Sachverhalts. Ein lineares deterministisches Modell ist damit die am höchsten idealisierte Darstellung realer Vorgänge.

Die Annahme eines linearen Verlaufs der Leistung bedeutet im Umkehrschluss, dass der Aufwandswert als konstant angenommen wird (siehe Abb. 4-26). D.h. unabhängig davon, wie sehr sich die Einflussgrößen ändern, es wird immer vorausgesetzt, dass der gleiche Aufwandswert erzielbar ist. In der Realität wird dies nicht zutreffen, da sich die Umstände der Leistungserbringung und auch der Einsatz unterschiedlicher Ressourcen wesentlich auf die Höhe des Aufwandswerts auswirken werden.<sup>61</sup>



**Abb. 4-26** Zusammenhang zwischen der Änderung der Einflussgröße und dem Aufwandswert – Typ 1<sup>62</sup>

Die Vorteile bei der Anwendung linearer deterministischer Modelle sind die einfache Verständlichkeit und Anwendbarkeit. Die Nachteile liegen in möglichen Fehlinterpretationen und Fehlentscheidungen, die aufgrund von Ergebnissen aus linearen deterministischen Modellen gezogen werden. Unsicherheiten werden in keiner Form berücksichtigt und lineare Ansätze bilden eine starke Vereinfachung, die zu einer Verzerrung der Realität führen kann.

### Typ 2

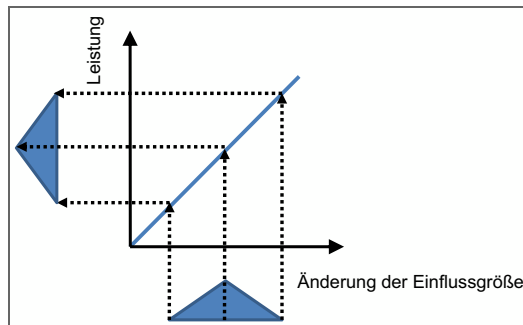
Beim Typ 2 herrscht ebenfalls ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden betrachteten Variablen, als Inputgröße wird allerdings nicht ein deterministischer Wert, sondern eine Verteilungsfunktion (in Abb. 4-27 demonstrativ als Dreiecksfunktion eingezeichnet) angesetzt. Dadurch wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die Inputgrößen selbst oft mit Unsicherheiten behaftet sind. Die Bandbreite der Outputgröße ist von der Steigung der Geraden abhängig, die den linearen Zusammenhang herstellt. Bei einer flach verlaufenden Geraden wird die Bandbreite geringer, bei einer steileren Geraden wird diese größer. Die Form der Inputgröße bleibt jedoch auch für die Outputgröße erhalten.

<sup>60</sup> Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. 63

<sup>61</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. 63f

<sup>62</sup> Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. 64





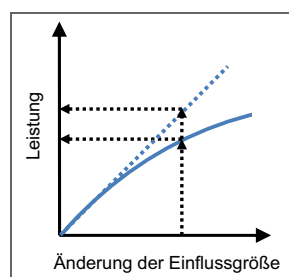
**Abb. 4-27** Linearer Zusammenhang zwischen Input und Output – probabilistische Betrachtung – Typ 2

Der Vorteil gegenüber Typ 1 besteht darin, dass die Unsicherheiten der Inputgrößen durch den Ansatz von Verteilungsfunktionen berücksichtigt werden. Da aber auch bei Typ 2 ein linearer Zusammenhang vorausgesetzt wird, kommt es auch hier zu keiner völlig zufriedenstellenden Abbildung realer Abläufe.

### Typ 3

Der Zusammenhang zwischen geänderten Einflussgrößen und der damit verbundenen Leistung wird in der Realität einen nichtlinearen Verlauf aufweisen, sobald es zu einer Über- oder Unterschreitung entsprechender Grenzgrößen kommt. Der qualitative Zusammenhang zwischen der Änderung der Eingangsgröße und der Leistung, unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten, ist in Abb. 4-28 dargestellt.<sup>63</sup>

Liegt ein nichtlinearer Zusammenhang vor, ist der einfachste Umgang mit einer solchen Kurve, einen deterministischen Wert als Inputgröße zu wählen und eine ebenfalls deterministische Outputgröße zu errechnen (siehe Abb. 4-28). Für eine verbesserte deterministische Berechnung kann eine Bandbreitenbetrachtung durchgeführt werden, bei der minimale und maximale Inputgrößen eingesetzt werden.



**Abb. 4-28** Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Input und Output – deterministische Betrachtung – Typ 3<sup>64</sup>

Werden solche Nichtlinearitäten in den Berechnungen nicht integriert, kann es zu einer deutlichen Überschätzung der erzielbaren Leistung und damit zu einer Unterschätzung der entsprechenden Aufwandswerte kommen.

<sup>63</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. 63f

<sup>64</sup> Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. 63

Hintergrund für den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Änderung der Einflussgröße und der Leistung ist die Tatsache, dass bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen unterschiedliche Aufwandswerte erzielt werden (siehe Abb. 4-29).<sup>65</sup>

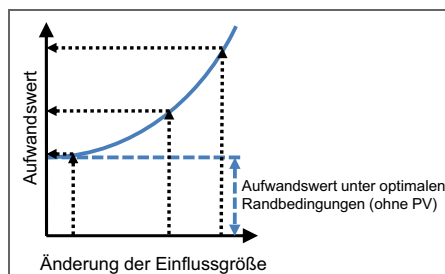


Abb. 4-29 Zusammenhang zwischen der Änderung der Einflussgröße und dem Aufwandswert – Typ 3<sup>66</sup>

Bei Typ 3 werden nichtlineare Zusammenhänge berücksichtigt, jedoch erfolgt die Eingabe der Inputgrößen ausschließlich über deterministische Werte, die voraussetzen, dass die Inputgrößen mit keinen Unsicherheiten behaftet sind.

#### Typ 4

Werden bei einem nichtlinearen Zusammenhang auch probabilistische Überlegungen miteinbezogen, können als Inputgrößen Verteilungsfunktionen angesetzt werden. In Abb. 4-30 ist der Zusammenhang zwischen der Änderung der Einflussgröße und der Aufwandswerverhöhung dargestellt. Der unsichere Input wird durch eine Dreiecksfunktion symbolisiert. Das Ergebnis (= Output) ist dann je nach Steigung und Krümmung der Zusammenhangsfunktion eine Verteilungsfunktion, deren Form nicht mehr jener der Inputgröße entspricht, sondern entsprechend verzerrt ist.

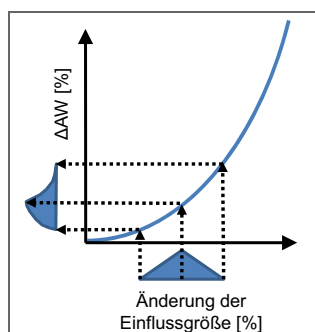


Abb. 4-30 Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Input und Output – probabilistische Betrachtung – Typ 4<sup>67</sup>

Bei diesem Typ werden sowohl nichtlineare Zusammenhänge als auch Unsicherheiten der Inputgrößen berücksichtigt. Damit ist eine bessere Annäherung an die Realität – als dies bei den Typen 1 bis 3 der Fall ist – möglich.

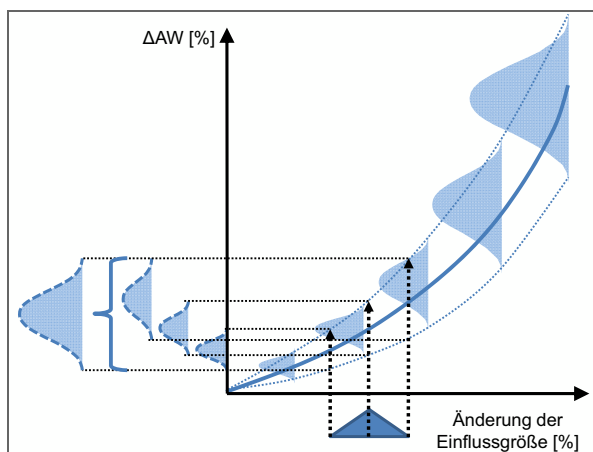
<sup>65</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. 63f

<sup>66</sup> Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. 64

<sup>67</sup> Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. 68

### Typ 5

In einem nächsten Schritt müsste auch dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Kurve, die den Zusammenhang zwischen zwei Variablen repräsentiert, selbst mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist. Wird z.B. der nichtlineare Zusammenhang zwischen der verringerten Krankkapazität und der damit verbundenen Aufwandswerterhöhung betrachtet, basiert dieser auf empirisch erhobenen Daten (z.B. ExpertInnenbefragungen), die naturgemäß mit gewissen Streuungen behaftet sind. D.h. die Daten, die dem Kurvenverlauf zugrunde liegen, weisen eine gewisse Streuung auf. Im Falle der Krankkapazitätsreduktion bei Schalarbeiten wurde in der Studie von Hofstadler<sup>68</sup> im Zuge einer ExpertInnenbefragung z.B. in 10 %-Schritten abgefragt, welche Auswirkungen eine prozentmäßige Krankkapazitätsreduktion auf die Aufwandswert-erhöhung hat. Umgelegt auf Abb. 4-31 bedeutet dies, dass in bestimmten Intervallen auf der Abszisse, Verteilungen für die Aufwandswerterhöhung vorliegen. Die minimalen und maximalen Werte dieser Verteilungen begrenzen einen nichtlinearen Bereich, der den Wahrscheinlichkeitsraum aufspannt, in dem bei Änderung der Einflussgröße eine Aufwandswerterhöhungen zu erwarten ist. Die untere der drei Kurven orientiert sich an den minimalen Nennungen und die obere an den maximalen Nennungen für mögliche Aufwandswerterhöhungen infolge der Änderung der Einflussgrößen.



**Abb. 4-31** Nichtlinearer probabilistischer Zusammenhang zwischen Input und Output – probabilistische Betrachtung – Typ 5

Werden diesem Modell auch noch probabilistische Inputgrößen zugrunde gelegt, kann durch die Überlagerung der Outputs die gesamte Wahrscheinlichkeitsverteilung möglicher Aufwandswerterhöhungen ermittelt werden (siehe schematische Darstellung in Abb. 4-31). Es werden bei einer solchen Berechnung sowohl die Unsicherheiten aus der nichtlinearen Modellbildung als auch der Inputgrößen bestmöglich berücksichtigt.

Typ 5 stellt damit jene Abbildung der Realität dar, die am wenigsten Idealisierungen und Vereinfachungen enthält. Der Nachteil liegt im großen Aufwand bei der Umsetzung für ein konkretes Berechnungsmodell, weshalb für die weiteren Betrachtungen auf den Typ 4 zurückgegriffen wird.

<sup>68</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 262ff

## 4.9 Produktivitätsverluste im Baubetrieb

Die in dieser Arbeit vorrangig betrachteten Produktivitätsverluste wurden bereits in Abb. 3-12 (siehe Seite 58) symbolisch angeführt. Es handelt sich dabei um:

- verminderte Krankkapazität
- Einsatzortwechsel
- Tagestemperatur
- Erhöhte tägliche Arbeitszeit
- Veränderte Lichtverhältnisse
- Planungsqualität/Planverzug
- Überschreitung der Arbeitsgruppengröße
- Unterschreitung der Arbeitsgruppengröße
- Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche

Die nichtlinearen Kurvenverläufe der Aufwandswernerhöhungen dieser Einzelproduktivitätsverluste werden in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.<sup>69</sup>

### 4.9.1 Verminderte Krankkapazität

Werden auf einer Baustelle mehr Krane benötigt, als baubetrieblich sinnvoll installiert werden können (z.B. aus Platzgründen), sind Produktivitätsverluste bzw. eine Erhöhung der Aufwandswerte die Folge.<sup>70</sup> In Abb. 4-32 ist der im Zuge einer ExpertInnenbefragung an der TU Graz<sup>71</sup> ermittelte nichtlineare Verlauf für die Aufwandswernerhöhung in Abhängigkeit der Kran-Kapazitätsreduktion  $\Delta AW_{ERH,KK}$  [%] als M-Schätzer-Trendlinie dargestellt.

Die Kran-Kapazitätsreduktion  $KK_{RED}$  [%] ergibt sich aus der Anzahl der vorhandenen Krane  $ANZ_{K,VOR}$  [Krane] und der optimalen Anzahl an Kranen  $ANZ_{K,OPT}$  [Krane] nach Glg. (4-1).

$$KK_{RED} = \left(1 - \frac{ANZ_{K,VOR}}{ANZ_{K,OPT}}\right) \cdot 100 \% \quad (4-1)$$

Der nichtlineare Kurvenverlauf für Stahlbetonarbeiten wird durch die nachfolgende Gleichung beschrieben:<sup>72</sup>

$$\Delta AW_{ERH,KK} = -0,000093 \cdot KK_{RED}^3 + 0,013934 \cdot KK_{RED}^2 + 0,410561 \cdot KK_{RED} \quad (4-2)$$

<sup>69</sup> Für die Aufwandswernerhöhung infolge von Einsatzortwechseln und verminderter Planungsqualität bzw. Planverzug liegen aus der zitierten ExpertInnenbefragung noch keine publizierten Ergebnisse vor.

<sup>70</sup> Wenn keine Kompensation durch andere Maßnahmen möglich ist.

<sup>71</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb.

<sup>72</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. S. 73

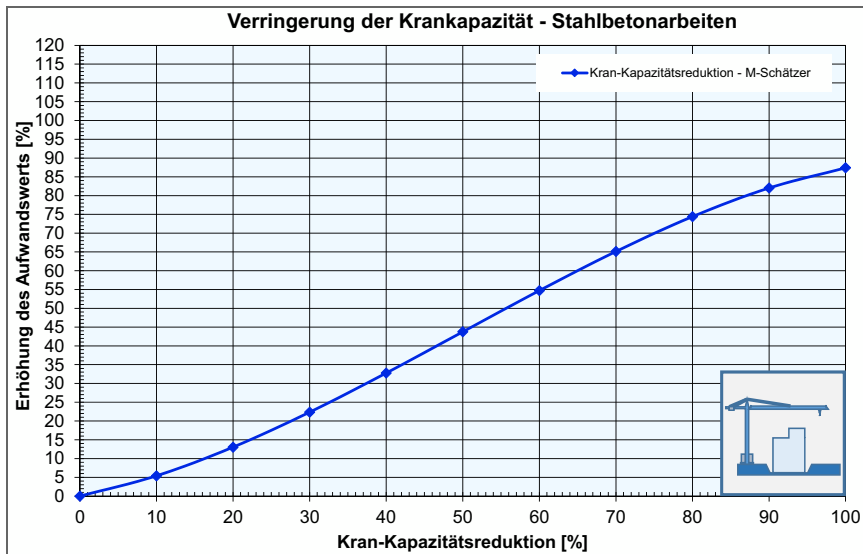


Abb. 4-32 Verlauf der Aufwandswerterhöhung – Verringerte Krankkapazität – Stahlbetonarbeiten<sup>73</sup>

#### 4.9.2 Tagestemperatur

Bei Arbeiten im Freien bestimmen die Wetterverhältnisse und unter anderem auch die Außentemperatur die Leistungsfähigkeit der Arbeitskräfte. Menschen auf der Baustelle können bei kälteren Temperaturen die Tätigkeiten nicht mehr mit der „Normal-Produktivität“ ausführen, da sie beispielsweise durch die wärmere Kleidung (z.B. dickere Jacken, dickere Handschuhe) in den Bewegungsabläufen beeinträchtigt sind. Die Produktivität reduziert sich außerdem durch Pausen zum Aufwärmen sowie durch das Zurechtrücken der Kleidung. Geräte, die zur Beheizung aufgestellt sind, können die Bewegungsabläufe der Arbeitskräfte zusätzlich beeinträchtigen. Während des Arbeitens bei tieferen Temperaturen werden Präzision und Schnelligkeit bei den einzelnen Handgriffen verringert und somit die Produktivität reduziert.<sup>74</sup>

Bei Hitze wird die Produktivität beispielsweise durch zusätzliche „Verschnauf-“ und Trinkpausen verringert. Weiters kann es bei höheren Temperaturen (z.B. bei Arbeiten mit Stahl) notwendig werden, Schutzhandschuhe zu tragen, die die Bewegungsabläufe verlangsamen können. Die persönliche Schutzausrüstung wirkt störend und verstärkt das Empfinden der Hitze.<sup>75</sup>

Im Zuge der an der TU Graz<sup>76</sup> durchgeführten ExpertInnenbefragung wurde ein Kurvenverlauf für die Aufwandswerterhöhung bei Stahlbetonarbeiten im Zusammenhang mit der Tagestemperatur ermittelt (siehe Abb. 4-33).

<sup>73</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. S. 73

<sup>74</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 76ff

<sup>75</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 76ff

<sup>76</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb.

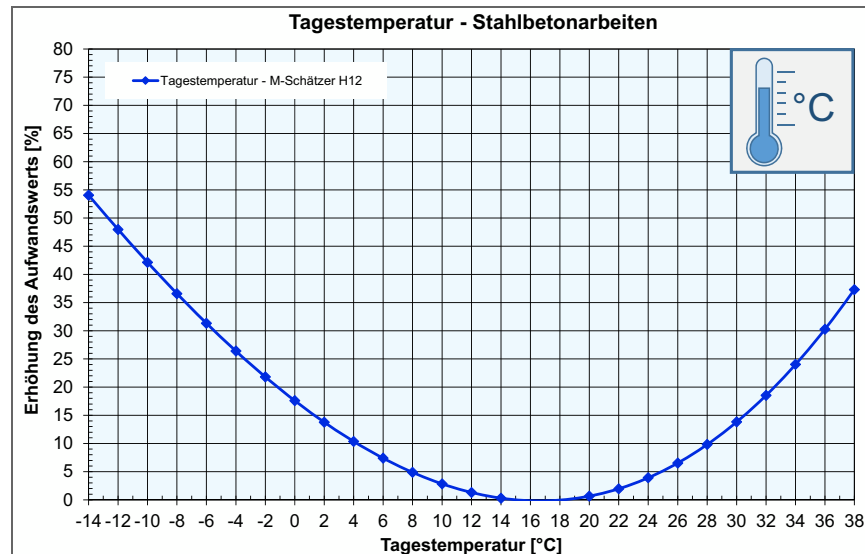


Abb. 4-33 Verlauf der Aufwandswerterhöhung – Tagestemperatur – Stahlbetonarbeiten<sup>77</sup>

Die Aufwandswerterhöhung infolge einer nicht optimalen Tagestemperatur  $\Delta AW_{ERH,TMP}$  [%] errechnet sich nach Glg. (4-3) durch Einsetzen der Tagestemperatur TMP [°C]. Die Gleichung gilt für  $-14^{\circ}\text{C} \leq \text{TMP} \leq 17,5^{\circ}\text{C}$  und  $18,5^{\circ}\text{C} \leq \text{TMP} \leq 38^{\circ}\text{C}$ .<sup>78</sup>

$$\Delta AW_{ERH,TMP} = 0,000466 \cdot \text{TMP}^3 + 0,048878 \cdot \text{TMP}^2 - 2,011685 \cdot \text{TMP} + 17,597270 \quad (4-3)$$

#### 4.9.3 Erhöhte tägliche Arbeitszeit

Ab einer gewissen Dauer der täglichen Arbeitszeit stellen sich bei den Arbeitskräften Ermüdungserscheinungen und auch eine sinkende Motivation ein, die sich negativ auf die Arbeitsproduktivität auswirken.<sup>79</sup>

Übersteigt die tägliche Arbeitszeit einen gewissen Grenzwert, sind Produktivitätsverluste bzw. eine Erhöhung des Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten zu erwarten, die im Zuge einer ExpertInnenbefragung an der TU Graz<sup>80</sup> erhoben wurden.

Die Kurven in Abb. 4-34 zeigen den Zusammenhang zwischen der effektiven Arbeitszeit bzw. den Produktivitätsverlusten und der täglichen Arbeitszeit. Bei den Kurven wird unterschieden, ob die längere tägliche Arbeitszeit bereits zu Beginn der Arbeiten oder erst kurzfristig bekannt gegeben wurde.

<sup>77</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 434

<sup>78</sup> Im Bereich zwischen  $17,5^{\circ}\text{C}$  und  $18,5^{\circ}\text{C}$  würden sich nach Glg. (4-3) geringfügig negative Werte für die Aufwandswerterhöhung ergeben. Es wird für diesen Temperaturbereich angenommen, dass es zu keiner Aufwandswerterhöhung kommt. Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 434f

<sup>79</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 20

<sup>80</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb.

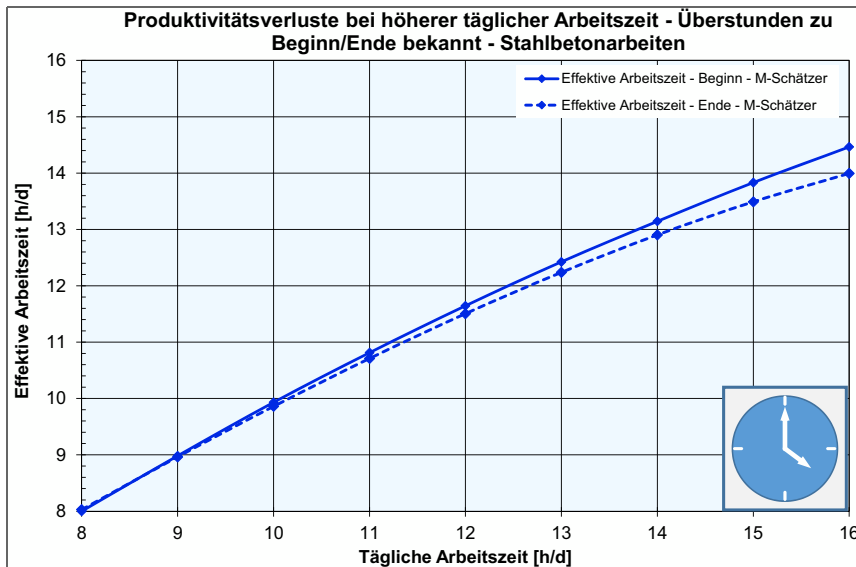


Abb. 4-34 Produktivitätsverluste bei höherer täglicher Arbeitszeit – Stahlbetonarbeiten<sup>81</sup>

Die effektiv für den Baubetrieb nutzbare Arbeitszeit  $AZ_{STB,Beginn}$  [h/d] – wenn diese am Beginn der Arbeiten bekannt gegeben wird – kann durch Glg. (4-4) durch Einsetzen der nominellen täglichen Arbeitszeit  $AZ_{STB,n}$  [h/d] ermittelt werden.<sup>82</sup>

$$AZ_{STB,Beginn} = -0,000865 \cdot AZ_{STB,n}^3 + 0,010452 \cdot AZ_{STB,n}^2 + 0,974168 \cdot AZ_{STB,n} \quad (4-4)$$

Die effektiv für den Baubetrieb nutzbare Arbeitszeit  $AZ_{STB,Ende}$  [h/d] – wenn diese am Ende der Arbeiten bekannt gegeben wird – kann durch Glg. (4-5) durch Einsetzen der nominellen täglichen Arbeitszeit  $AZ_{STB,n}$  [h/d] ermittelt werden.<sup>83</sup>

$$AZ_{STB,Ende} = -0,001231 \cdot AZ_{STB,n}^3 + 0,013441 \cdot AZ_{STB,n}^2 + 0,974722 \cdot AZ_{STB,n} \quad (4-5)$$

Für die nominelle tägliche Arbeitszeit  $AZ_{STB,n}$  [h/d] gilt:  
 $8 \text{ h/d} \leq AZ_{STB,n} \leq 16 \text{ h/d}$ .

#### 4.9.4 Veränderte Lichtverhältnisse

Die Kombination der Produktionsfaktoren wird auch durch die herrschenden Lichtverhältnisse beeinflusst. Im Zuge einer ExpertInnenbefragung an der TU Graz<sup>84</sup> wurden die Aufwandswerterhöhungen bei sechs unterschiedlichen Lichtkategorien ermittelt.<sup>85</sup>

<sup>81</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 442

<sup>82</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 439

<sup>83</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 441

<sup>84</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb.

<sup>85</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 279ff

Die sechs Kategorien werden für die Anwendung der ermittelten Kurvenverläufe in Zahlenwerte übergeführt:<sup>86</sup>

- LV = 0                      Tageslicht                      Sehr gut
- LV = 1                      Stark bewölkt                      Gut
- LV = 2                      Dämmerung                      Befriedigend
- LV = 3                      Nacht-A<sup>87</sup>                      Mäßig
- LV = 4                      Nacht-B<sup>88</sup>                      Schlecht
- LV = 5                      Nacht-C<sup>89</sup>                      Sehr schlecht

In Abb. 4-35 ist der nichtlineare Zusammenhang zwischen den Lichtverhältnissen und der Aufwandswerterhöhung der Stahlbetonarbeiten dargestellt.

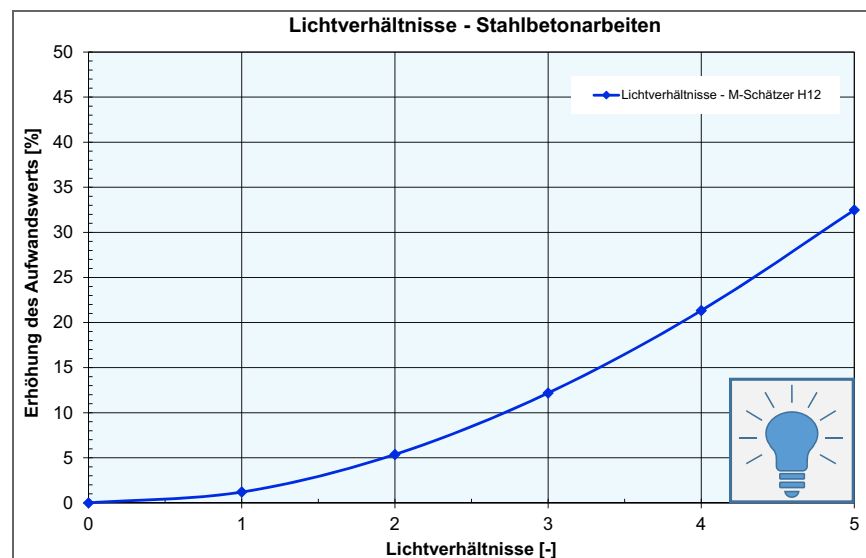


Abb. 4-35 Verlauf der Aufwandswerterhöhung – Lichtverhältnisse – Stahlbetonarbeiten<sup>90</sup>

Die Aufwandswerterhöhung aufgrund veränderter Lichtverhältnisse  $\Delta AW_{ERH,LV}$  [%] wird durch Einsetzen des Faktors LV in Glg. (4-6) ermittelt und gilt für  $0 < LV \leq 5$ .<sup>91</sup>

$$\Delta AW_{ERH,LV} = -0,052882 \cdot LV^3 + 1,641323 \cdot LV^2 - 0,389217 \cdot LV \quad (4-6)$$

#### 4.9.5 Über- oder Unterschreitung der Arbeitsgruppengröße

Arbeitsintensive Tätigkeiten werden nicht durch den Geräteeinsatz, sondern durch die Arbeitskräfte vor Ort bestimmt. Die Aufgaben werden meist in Arbeitsgruppen erledigt, wobei die kleinste Arbeitsgruppe aus zwei Arbeitskräften besteht. Um die „Normal-Produktivität“ erzielen zu können, gibt es für

<sup>86</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 443f

<sup>87</sup> Nacht-A: Flächige Ausleuchtung des gesamten Baustellenbereichs mit künstlichem Licht.

<sup>88</sup> Nacht-B: Teilweise flächige Ausleuchtung des Fertigungsabschnitts, in dem die betrachteten Arbeiten ausgeführt werden.

<sup>89</sup> Nacht-C: Nur Einzelbeleuchtungen, die nicht den gesamten Arbeitsraum des Fertigungsabschnitts ausleuchten.

<sup>90</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 444

<sup>91</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 444



jede Tätigkeit eine optimale Anzahl an Arbeitskräften. Kleinere Änderungen der Anzahl werden sich weniger stark auf die Produktivität auswirken als große Abweichungen von dieser optimalen Anzahl. Im Zuge einer ExpertInnenbefragung an der TU Graz<sup>92</sup> wurde erhoben, welche Aufwandswerterhöhung zu erwarten ist, wenn die optimale Anzahl an Arbeitskräften um einen bestimmten Prozentsatz unter- bzw. überschritten wird. Das Ergebnis der Befragung ist in Abb. 4-36 in Form von zwei nichtlinearen Kurvenverläufen dargestellt.<sup>93</sup>

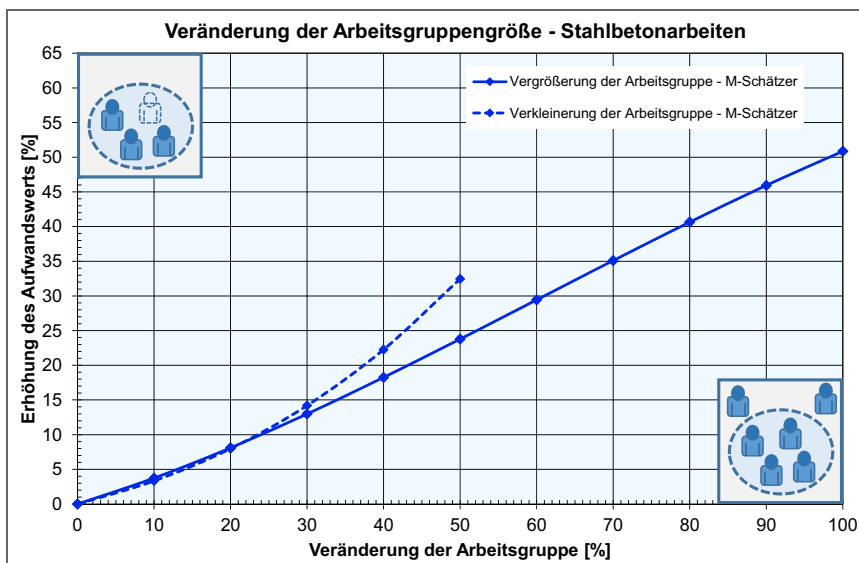


Abb. 4-36 Verlauf der Aufwandswerterhöhung – Veränderung der Arbeitsgruppengröße – Stahlbetonarbeiten<sup>94</sup>

Für die Arbeitsgruppenvergrößerung liegen Werte bis zu einer Erhöhung von 100 % vor. Dies bedeutet jedoch, dass alle Arbeitskräfte in der gleichen Gruppe arbeiten und nicht etwa in zwei getrennte Gruppen aufgeteilt werden.

Die Arbeitskräfteerhöhung  $AK_{ERH}$  [%] errechnet sich aus der Anzahl der vorhandenen Arbeitskräfte  $ANZ_{AK,VOR}$  [Std/h] und der optimalen Arbeitskräfteanzahl  $ANZ_{AK,OPT}$  [Std/h] nach Glg. (4-7).<sup>95</sup>

$$AK_{ERH} = \left( \frac{ANZ_{AK,VOR}}{ANZ_{AK,OPT}} - 1 \right) \cdot 100 \% \quad (4-7)$$

Die Gleichung für die Aufwandswerterhöhung bei Arbeitsgruppenvergrößerung  $\Delta AW_{AK,ERH}$  [%] lautet:<sup>96</sup>

$$\Delta AW_{AK,ERH} = -0,000021 \cdot AK_{ERH}^3 + 0,003809 \cdot AK_{ERH}^2 + 0,337748 \cdot AK_{ERH} \quad (4-8)$$

<sup>92</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb.

<sup>93</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. S. 71f

<sup>94</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 415

<sup>95</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 411

<sup>96</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 412

Für die Arbeitsgruppenverkleinerung liegen Werte bis zu einer Reduktion von 50 % vor. Die Arbeitskräftereduktion  $AK_{RED}$  [%] errechnet sich aus der Anzahl der vorhandenen Arbeitskräfte  $ANZ_{AK,VOR}$  [Std/h] und der optimalen Arbeitskräfteanzahl  $ANZ_{AK,OPT}$  [Std/h] nach Glg. (4-9).<sup>97</sup>

$$AK_{RED} = \left(1 - \frac{ANZ_{AK,VOR}}{ANZ_{AK,OPT}}\right) \cdot 100 \% \quad (4-9)$$

Die Gleichung für die Aufwandswerterhöhung bei Arbeitsgruppenverkleinerung  $\Delta AW_{AK,RED}$  [%] lautet:<sup>98</sup>

$$\Delta AW_{AK,RED} = 0,000045 \cdot AK_{RED}^3 + 0,005184 \cdot AK_{RED}^2 + 0,277539 \cdot AK_{RED} \quad (4-10)$$

#### 4.9.6 Mindestarbeitsfläche

Auf einer vorgegebenen Fläche (z.B. einem eingeschalteten Deckenabschnitt) kann nur eine gewisse Anzahl an Arbeitskräften produktiv eingesetzt werden. Werden zu viele Arbeitskräfte auf engem Raum beschäftigt, behindern diese sich gegenseitig und verursachen Produktivitätsverluste. Im Zuge einer ExpertInnenbefragung an der TU Graz<sup>99</sup> wurde erhoben, wie die Aufwandswert-erhöhung bei Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche eingeschätzt wird. In Abb. 4-37 ist der aus der Befragung generierte, nichtlineare Kurvenverlauf für flächige Stahlbetonbauteile dargestellt.

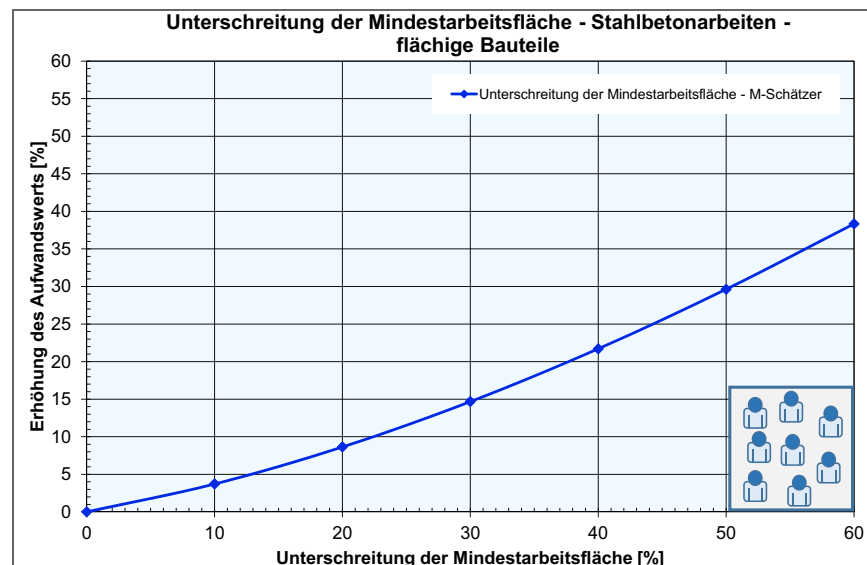


Abb. 4-37 Verlauf der Aufwandswerterhöhung – Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche - Stahlbetonarbeiten – flächige Bauteile<sup>100</sup>

Die Arbeitsflächenreduktion  $AF_{RED}$  [%] ergibt sich aus der vorhandenen Arbeitsfläche  $AF_{VOR}$  [m<sup>2</sup>] und der Mindestarbeitsfläche  $AF_{MIN}$  [m<sup>2</sup>] nach Glg. (4-11).

<sup>97</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 413

<sup>98</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 414

<sup>99</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb.

<sup>100</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. S. 74

$$AF_{\text{RED}} = \left(1 - \frac{AF_{\text{VOR}}}{AF_{\text{MIN}}}\right) \cdot 100 \% \quad (4-11)$$

Der nichtlineare Zusammenhang zwischen der Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche  $AF_{\text{RED}}$  [%] und der Aufwandswerterhöhung  $\Delta AW_{\text{ERH,AF}}$  [%] wird wie folgt beschrieben:<sup>101</sup>

$$\Delta AW_{\text{ERH,AF}} = -0,000018 \cdot AF_{\text{RED}}^3 + 0,00661 \cdot AF_{\text{RED}}^2 + 0,30707 \cdot AF_{\text{RED}} \quad (4-12)$$

#### 4.10 Gleichzeitig auftretende Produktivitätsverluste

Tritt nur ein Produktivitätsverlust auf, kann dieser beispielsweise über die angegebenen nichtlinearen Kurvenverläufe aus Abschnitt 4.9 berechnet werden. Anders verhält es sich, wenn mehrere Produktivitätsverluste gleichzeitig auftreten. Als Basis werden zwar die gleichen Kurvenverläufe herangezogen, es muss aber auch die gegenseitige Beeinflussung und Aufschaukelung der Produktivitätsverluste berücksichtigt werden. Sind die gleichen Ressourcen (z.B. Anzahl der Krane oder Anzahl der Arbeitskräfte) von Produktivitätsverlusten betroffen, ist die Summe von zwei Einzelproduktivitätsverlusten nicht das Gleiche wie das gemeinsame Auftreten dieser beiden Produktivitätsverluste.<sup>102</sup>

Es gilt zu untersuchen, ob sich die unterschiedlichen Einzelfaktoren gegenseitig beeinflussen, oder ob diese unabhängig voneinander sind. Weiters ist zu klären, ob die vorgegebene Bauzeit als fixiert gilt, oder ob eine Bauzeitverlängerung infolge der Produktivitätsverluste zulässig ist. Muss die vorgegebene Bauzeit unbedingt eingehalten werden, sind die auftretenden Produktivitätsverluste durch einen erhöhten Ressourceneinsatz auszugleichen. Dies kann aber – sofern entsprechende Puffer aufgebraucht sind und es zu Grenzgrößenüber- oder -unterschreitungen kommt – in weiterer Folge zu erhöhten oder zusätzlichen Produktivitätsverlusten führen. Beeinflussen sich die Produktivitätsverluste nicht gegenseitig und kann auch die Bauzeit entsprechend verlängert werden, genügt eine einfache Addition der Aufwandswerterhöhungen. Sind jedoch gegenseitige Abhängigkeiten vorhanden, ist eine Addition alleine nicht mehr ausreichend.<sup>103</sup>

In Abb. 4-38 sind die Auswirkungen zweier Produktivitätsverluste bei Addition und Aggregation einander qualitativ gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass bei einer Aggregation die Gesamtheit der Produktivitätsverluste mehr ist als nur die Summe der beiden Einzelproduktivitätsverluste.

<sup>101</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. S. 74

<sup>102</sup> Vgl. Kummer (2014). Additive Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten. S. 175f

<sup>103</sup> Vgl. Kummer (2014). Additive Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten. S. 176

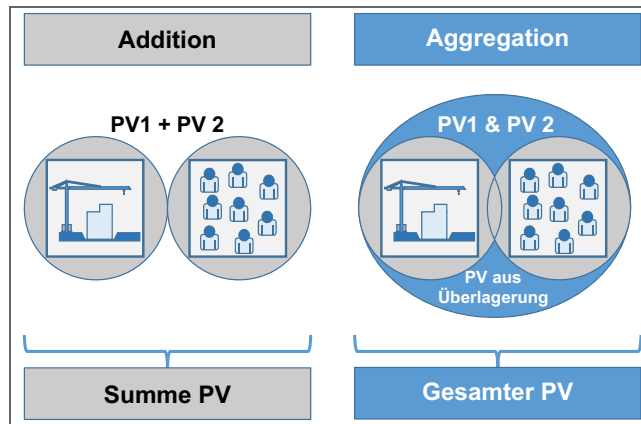


Abb. 4-38 Addition (links) und Aggregation (rechts) von Einzelproduktivitätsverlusten<sup>104</sup>

In der englischsprachigen Literatur werden die Auswirkungen, die durch eine gegenseitige Beeinflussung zu Produktivitätsverlusten führen auch als „Welleneffekt“ („ripple effects“) bezeichnet.<sup>105</sup>

Nachfolgend werden die beiden Begriffe der Addition und Aggregation im Zusammenhang mit der Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten näher betrachtet und die Begrifflichkeiten für die Verwendung in dieser Arbeit definiert.

#### 4.10.1 Addition von Produktivitätsverlusten

Eine reine Addition von Parametern ist durch das Kommutativ-<sup>106</sup> und das Assoziativgesetz<sup>107</sup> gekennzeichnet. Häufig werden auch Synonyme wie Kumulation<sup>108</sup> oder Akkumulation<sup>109</sup> verwendet, die aber im Grunde auch ein reines Zusammenzählen von unterschiedlichen Parametern oder Elementen beschreiben.

In dieser Arbeit wird unter Addition eine reine Summenbildung von Einzelmerkmalen (Risiken, Chancen, Produktivitätsverlusten etc.) ohne die Berücksichtigung von Rückkoppelungseffekten und Abhängigkeiten verstanden.

#### 4.10.2 Aggregation von Produktivitätsverlusten

Während der Begriff der Addition durch die Mathematik sehr klar definiert ist, gilt dies für die Aggregation nicht in dieser Form. Nachfolgend wird die Verwendung des Begriffs der Aggregation von einem allgemeinen Verständnis über die Verwendung im Unternehmensrisikomanagement hin zur baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Verwendung übergeführt und schließlich die Definition der Aggregation für diese Arbeit angegeben.

<sup>104</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2014). Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. S. 69

<sup>105</sup> Vgl. Greune (2014). Darstellung und Bewertung von Produktivitätsminderungen bei multiplen Bauablaufstörungen. S. 60ff

<sup>106</sup> Kommutativgesetz (Vertauschungsgesetz):  $a + b = b + a$

<sup>107</sup> Assoziativgesetz (Vereinigungsgesetz):  $(a + b) + c = a + (b + c)$

<sup>108</sup> von lat. *cumulus*, „Anhäufung“, „Ansammlung“

<sup>109</sup> von lat. *accumulare*, „anhäufen“, „ansammeln“

## Verständnis in anderen Wissenschaften

Im Brockhaus<sup>110</sup> wird der Begriff der Aggregation allgemein als Anhäufung bzw. Angliederung verstanden.

Das Gabler Wirtschaftslexikon führt unterschiedliche Bereiche für die Verwendung des Begriffs an:

„I Wirtschaftstheorie:

Zusammenfassung mehrerer Einzelgrößen hinsichtlich eines gleichartigen Merkmals, um Zusammenhänge zu gewinnen, [...] Die Höhe des Aggregationsniveaus wird durch die jeweilige Fragestellung bestimmt. [...]

II. Statistik:

Übergang von enger definierten zu umfassender definierten Variablen (Variablenaggregation) oder Übergang von Kenngrößen für enger abgegrenzte (Teil-)Gesamtheiten zu Kenngrößen, die sich auf umfassende Gesamtheiten beziehen (Sektorenaggregation). [...]

III. Ökonometrie:

Zur Schätzung makroökonomischer Relationen wird das Durchschnittsverhalten von Gruppen von Wirtschaftssubjekten zugrunde gelegt. Das setzt eine Zusammenfassung mikroökonomischer Sachverhalte über Haushalte und Unternehmen voraus. [...]

IV. Informatik:

Verdichtung von Daten. In der Datenmodellierung bedeutet Aggregation, verschiedene miteinander in Beziehung stehende Objekttypen zu einem höheren Objekttyp zusammenzufassen, damit im Folgenden auf den höheren Objekttyp im Ganzen verwiesen werden kann. [...].<sup>111</sup>

Im Historischen Wörterbuch der Philosophie wird der Begriff der Aggregation wie folgt definiert:

„Aggregation (von lat. aggregare, gesellen, häufen, aus <ad gregem agere>, zur Herde scharen) ist ein Ausdruck, der in verschiedenen Wissenschaften häufig in negativem Sinne von äußerlicher, «summenhafter» (im Gegensatz zu ganzheitlicher) Gruppierung verwendet wird. [...].<sup>112</sup>

Dabei beziehen sich die Ausführungen in weiterer Folge auf die Geographie, die als „Bündel verschiedener Wissenschaften“ bezeichnet wird. Eine direkte Anwendung dieser Definition auf das Risikomanagement oder den Umgang mit Produktivitätsverlusten ist damit nicht möglich.

In der Biologie bzw. Chemie wird die Aggregation wie folgt definiert:

„[...] 1) Chemie: Aggregat, Vereinigung von Molekülen zu größeren Molekülverbänden, auch Bezeichnung für die lockere Zusammenlagerung von Molekülen bzw. Ionen; [...] 2) Zellbiologie: Aggregationsverbände, a) Zusammenlagerung von Einzelzellen zu Verbänden, ohne daß ihre Individualität dabei verlorengelht; [...] b) Anhäufung oder Ansammlung von Bakterien; [...] 3) Ethologie: subsoziale Scheingesellschaft, einfachste Form einer Tiergesellschaft, die ohne soziale Anziehung durch die Wirkung von Umwelteinflüssen entsteht, z. B. die Ansammlung von Tieren an Tränken oder günstigen Überwinterungsquartieren oder von Schmetterlingen an attraktiven Blüten. [...].<sup>113</sup>

<sup>110</sup> Vgl. F.A. Brockhaus GmbH (1999). Brockhaus in fünfzehn Bänden – Band 1 – A-Bau. S. 69

<sup>111</sup> <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55812/aggregation-v12.html>. Datum des Zugriffs: 02.09.2015

<sup>112</sup> Historisches Wörterbuch der Philosophie – Band 1: A-C (1971). S. 102

Generell wird unter Aggregation damit eine Anhäufung, Ansammlung oder Bündelung von Einzelementen zu einem größeren Gesamten verstanden. Teilweise wird auch betont, dass Beziehungen bzw. Abhängigkeiten zwischen diesen Einzelementen herrschen.

### Verständnis im Risikomanagement

Der Begriff der Aggregation wird im Risikomanagement häufig im Zusammenhang mit quantitativer Risikobewertung verwendet. Nachfolgend werden einige Beispiele für die Verwendung in der Literatur angeführt.

Girmscheid und Busch beschreiben, dass es das Ziel der Risikoaggregation ist, eine Aussage über die Höhe der vertraglich akzeptierten Projektrisiken auf verschiedenen Unternehmensebenen zu ermöglichen. Dabei wird ein Bottom-Up-Ansatz verfolgt. Die Risikoaggregation ist eine Zusammenfassung von zahlreichen akzeptierten Einzelrisiken über geeignete Verfahren zu einem Gesamtrisiko der jeweiligen Unternehmensebene. Für die Risikoaggregation werden vier grundsätzliche Anforderungen angeführt:<sup>114</sup>

- Die Risikoaggregation muss zwingend von unten nach oben über den Bottom-Up-Ansatz erfolgen.
- Berücksichtigung der zeitnahen Entwicklung von akzeptierten Risiken
- Realitätsnahe Berücksichtigung von Interdependenzen (gegenseitige Abhängigkeiten) zwischen akzeptierten Risiken
- Einheitliche Risikobewertung als Basis der Risikoaggregation

Für die Unterscheidung zwischen Addition und Aggregation ist besonders der dritte Punkt dieser Auflistung von Interesse. Hier wird auf die Interdependenzen zwischen den Risiken eingegangen. Es handelt sich also bei einer Aggregation nicht nur um eine reine Aufsummierung von Risiken, es müssen auch die Abhängigkeiten und Effekte der gegenseitigen Beeinflussung berücksichtigt werden.

Dies wird auch in einer Studie der KPMG deutlich: „Bei der Beurteilung der (Gesamt-)Risikolage eines Unternehmens ist zu beachten, daß das aggregierte Unternehmensrisiko aufgrund möglicher kompensatorischer bzw. kumulativer Effekte der Einzelrisiken untereinander nicht unbedingt der Summe der Einzelrisiken entspricht.“<sup>115</sup>

Auch Gleißner verwendet den Begriff der Aggregation ähnlich:

„Eine Aggregation – sprich Zusammenfassung – aller relevanten Risiken ist also erforderlich. [...] Zielsetzung der Risikoaggregation ist nun die Bestimmung der Gesamtrisikoposition eines Unternehmens, insbesondere mit Blick auf diese beiden Größen [Anm.: Eigenkapital und Liquidität] sowie eine Ermittlung der relativen Bedeutung der Einzelrisiken unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen (Korrelationen) zwischen diesen. Dazu werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen einzelner Risiken zu einer Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielgröße des Unternehmens (z.B. Gewinn oder Cashflow) zusammengeführt. Mit dieser können dann Risikomaße für das

<sup>113</sup> Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1999). Online unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/aggregation/1481>. Datum des Zugriffs: 02.09.2015

<sup>114</sup> Vgl. Busch (2005). Holistisches und probabilistisches Risikomanagement-Prozessmodell für projektorientierte Unternehmen der Bauwirtschaft. S. 148f  
Vgl. Girmscheid/Busch (2008). Unternehmensrisikomanagement in der Bauwirtschaft. S. 75

<sup>115</sup> KPMG (1998). Integriertes Risikomanagement. Broschüre. S. 5

Gesamtunternehmen berechnet werden, die den Gesamtrisikoumfang charakterisieren.“<sup>116</sup>

Wallner geht sehr speziell auf die Abhängigkeiten von Risiken im Zuge der Aggregation ein:

„Wenn man von Abhängigkeiten von Risiken spricht, spricht man auch von der Aggregation von Risiken. Das aggregierte Risiko ist das Maß für die Gefahr, die durch die kombinierte Wirkung der verschiedenen Einzelszenarien dargestellt wird.“<sup>117</sup>

Sander unterscheidet ebenfalls zwischen Aggregation und Addition:

„Bei der Aggregation von Risiken, die durch Verteilungen definiert sind, dürfen diese nicht einfach addiert werden.“<sup>118</sup>

Sander bezieht sich dabei auf Risiken, die durch Dreiecksverteilungen definiert sind. Er vergleicht ein Einzelrisiko, das als erwarteten Wert die gleiche Schadenshöhe aufweist wie 10 Einzelrisiken, deren erwartete Schadenshöhe jeweils nur 1/10 jener des Einzelrisikos ausmachen. Die Einzelrisiken dürfen in diesem Fall nicht einfach aufaddiert werden, da es einer Aggregation dieser bedarf. Sander verwendet den Begriff der Addition für das Zusammenzählen (Addieren) von Verteilungsfunktionen mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation.<sup>119</sup>

Die Vorgänge, die im Zuge einer Monte-Carlo-Simulation bei reinem Zusammenzählen mehrerer Verteilungsfunktionen durchgeführt werden, sind nichts anderes als ein reines Addieren von Zufallszahlen innerhalb der definierten Bandbreiten der Einzelrisiken. Die von Sander beschriebene Aggregation ist – sofern Unabhängigkeit zwischen den Einzelrisiken vorausgesetzt wird – im Grunde nichts anderes als das Aufsummieren von Zufallszahlen und kann daher als „probabilistische Addition“ von Einzelrisiken bezeichnet werden. Werden – wie auch in der Dissertation von Sander angeführt – Korrelationen (und damit Abhängigkeiten) zwischen den Einzelrisiken berücksichtigt, handelt es sich um eine Risikoaggregation.

Der Begriff der Aggregation wird im Risikomanagement somit für das Zusammenfassen von Einzelrisiken verwendet, wobei hier auch gegenseitige Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Eine reine Risikoaddition bildet damit einen Sonderfall der Risikoaggregation, bei dem Unabhängigkeit zwischen den Einzelkomponenten vorausgesetzt wird.

### Verständnis in dieser Arbeit

„[...] unter Addition – die durch das Kommutativ- und das Assoziativgesetz gekennzeichnet ist – wird eine reine Summenbildung von Einzelmerkmalen (Risiken, Chancen, Produktivitätsverluste etc.) ohne die Berücksichtigung von Rückkoppelungseffekten und Abhängigkeiten verstanden.“<sup>120</sup>

„Unter Aggregation wird die Zusammenfassung von Einzelmerkmalen (Risiken, Chancen, Produktivitätsverluste etc.) zu einem globalen Merkmal (Bottom-Up-Ansatz) unter Berücksichtigung gegenseitiger Abhängigkeiten, Beziehungen und individueller Aufschaukelungen – mit Hilfe iterativer Berechnungen – verstanden.“<sup>121</sup>

<sup>116</sup> Gleißner (2011). Grundlagen des Risikomanagements im Unternehmen – Controlling, Unternehmensstrategie und wertorientiertes Management. S. 165

<sup>117</sup> Wallner (2004). Risikomanagementsysteme für den Bauherrn. S. 24

<sup>118</sup> Sander (2012). Probabilistische Risiko-Analyse für Bauprojekte. S. 106

<sup>119</sup> Vgl. Sander (2012). Probabilistische Risiko-Analyse für Bauprojekte. S. 106

<sup>120</sup> Kummer (2015). Aggregierte Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten. S. 172

Bei der Aggregation von Produktivitätsverlusten müssen schrittweise Iterationen durchgeführt werden. D.h., aufgrund von einem oder mehreren Produktivitätsverlusten kommt es zu einer Aufwandswerterhöhung, die (bei vorgegebener Bauzeit) durch eine Erhöhung des Ressourceneinsatzes (Erhöhung der Anzahl an Arbeitskräften, Verlängerung der täglichen Arbeitszeit etc.) ausgeglichen werden muss. Bedingt eine solche Forcierung neue oder höhere Produktivitätsverluste, muss weiter forciert werden, wodurch wieder Produktivitätsverluste entstehen usw. Die iterative Berechnung ist dann abgeschlossen (= Abbruchkriterium), wenn die erforderliche Leistung erreicht wird und der Ressourceneinsatz nicht weiter angepasst werden muss. Ist dieser Zustand erreicht, treten auch keine zusätzlichen Produktivitätsverluste mehr auf und die Ergebnisse für die Aufwandswerterhöhung verändern sich mit neuen Iterationsschritten nicht mehr. In MS Excel werden die iterativen Berechnungen operativ durch das Zulassen von Zirkelbezügen ermöglicht.

#### 4.11 Zusammenfassung

Baubetriebliches und bauwirtschaftliches Handeln ist durch nichtlineare Zusammenhänge und Unsicherheiten geprägt, die sich auch auf den Zusammenhang zwischen vorgegebener Bauzeit und Baukosten auswirken.

Bei der Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten unter Unsicherheit bringt der Einsatz probabilistischer Berechnungsverfahren (z.B. Monte-Carlo-Simulationen) sowohl für den AG als auch für Bieter und spätere AN einen Informationszugewinn und hilft dabei Entscheidungen auf Basis des aktuellen Wissensstands vorzubereiten.

In diesem Kapitel wurde auf den grundlegenden Zusammenhang zwischen vorgegebener Bauzeit und Baukosten eingegangen und anhand von Literaturangaben analysiert. Mehrheitlich wird dabei ein nichtlinearer Zusammenhang, bei dem eine zu kurze Bauzeit zu einem höheren Kostenanstieg führt als eine zu lange Bauzeit, vermutet. Teilweise sind die angegebenen Kurvenverläufe kritisch zu hinterfragen bzw. auf deren Anwendbarkeit zu überprüfen.

Weiters wurde auf die möglichen Gründe für eine nicht normale Bauzeit und auf grundlegende Kostenverläufe im baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Kontext eingegangen.

Der Einfluss von Nichtlinearitäten und die Arten möglicher Zusammenhänge zwischen zwei Variablen bilden wesentliche Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit und zeigen die Problematik, die mit linearen Ansätzen in der Modellbildung verbunden sind, auf. Die für die weitere Arbeit verwendeten nichtlinearen Kurvenverläufe für Einzelproduktivitätsverluste, bezogen auf Stahlbetonarbeiten, wurden in Form von Diagrammen und Gleichungen angegeben.

Abschließend wurde auf das gleichzeitige Auftreten von Produktivitätsverlusten und die Unterscheidung zwischen Addition und Aggregation von Produktivitätsverlusten eingegangen.

<sup>121</sup> Kummer (2015). Aggregierte Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten. S. 172



## 5 Grundlagen zur Anwendung der Monte-Carlo-Simulation

Die Problematik, dass bei Baukosten- und Bauzeitberechnungen, die die Zukunft betreffen, deterministische Ansätze unzureichend und im Grunde nur falsch sein können, wird dadurch begegnet, dass anstelle von einzelnen Zahlenwerten Verteilungsfunktionen als Inputs angesetzt werden.

Um mit solchen Verteilungen rechnen zu können sind entweder aufwändige mathematische Operationen (Faltungen) erforderlich – bei denen schnell komplizierte Integrale entstehen – oder es werden Simulationsverfahren auf Basis von Zufallszahlen verwendet. Ein Verfahren für solche probabilistischen Simulationsverfahren ist die Monte-Carlo-Methode bzw. die Monte-Carlo-Simulation.

In diesem Kapitel wird nach einem kurzen historischen Rückblick und der Einordnung des Verfahrens in das breite Feld der Mathematik auf die wichtigsten Begriffe für das Verständnis der Simulationsmethode und die Interpretation der Ergebnisse eingegangen. Literaturvergleiche zeigen die bisherige Verwendung von Verteilungsfunktionen und Korrelationen beim Einsatz der Monte-Carlo-Simulation im Baubetrieb und der Bauwirtschaft. Weiters wird die Funktionsweise der Methode gezeigt und der Einfluss unterschiedlicher Verteilungsfunktionen und Korrelationen auf die Simulationsergebnisse analysiert.

### 5.1 Historische Entwicklung

Bei Monte-Carlo-Simulationen werden Zufallszahlen für die Lösung von mathematischen Problemen herangezogen.

Zufällige Ereignisse zur Lösung von numerischen Problemen zu verwenden wurde bereits im 18. Jahrhundert angewandt. Ein bekanntes Beispiel ist die Ermittlung der Kreiszahl  $\pi$  durch das zufällige Zuliegenkommen von Nadeln auf liniertem Papier.<sup>1</sup>



**Abb. 5-1** Begründer der Monte-Carlo-Methode – links: John von Neumann<sup>2</sup> – rechts: Stanislaw Ulam<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Diese Bestimmung der Kreiszahl ist als „Nadelproblem von Buffon“ bekannt. Die Berechnung erfolgt dabei über den Winkel, den die Nadeln mit liniertem Papier einschließen.

<sup>2</sup> Foto: [http://de.wikipedia.org/wiki/John\\_von\\_Neumann#mediaviewer/File:JohnvonNeumann-LosAlamos.gif](http://de.wikipedia.org/wiki/John_von_Neumann#mediaviewer/File:JohnvonNeumann-LosAlamos.gif). Datum des Zugriffs: 26.11.2014

<sup>3</sup> Foto: [http://www.atomicarchive.com/History/hbomb/page\\_10.shtml](http://www.atomicarchive.com/History/hbomb/page_10.shtml). Datum des Zugriffs: 26.11.2014

Bedeutung erlangte die Methode erst während des Zweiten Weltkriegs. Bei Arbeiten im Zusammenhang mit der Herstellung der Atombombe („Manhattan Project“) wurden weitere Forschungen auf dem Gebiet der Monte-Carlo-Methode durchgeführt.<sup>4</sup>

Als Begründer der Methode gelten Neumann und Ulam (siehe Abb. 5-1) wobei der Name der Methode auf das berühmte Casino in Monte Carlo zurückgeht. Dort wurden die Ergebnisse der Roulettespiele regelmäßig veröffentlicht. Es handelt sich beim Roulettespiel um eine einfache mechanische Möglichkeit zur Generierung von Zufallszahlen. Die erste Arbeit zum Thema stammt von Metropolis/Ulam mit dem Titel „The Monte Carlo method“ und wurde im Jahre 1949 veröffentlicht. Dies wird auch als Geburtsjahr des Verfahrens angesehen.<sup>5</sup>

## 5.2 Methodik

Die Monte-Carlo-Methode ist ein numerisches Verfahren, bei dem mit Hilfe von Zufallszahlen Simulationen durchgeführt werden. Das Ergebnis jedes Simulationsschritts (auch als Iteration bezeichnet) ist eine Zufallsgröße, die auf Basis eines vorgegebenen Berechnungsmodells ermittelt wird.

Zufallszahlen bilden eine künstliche Stichprobe, die mit einem Zufallsgenerator am Computer ermittelt werden. Breite Anwendung fand die Methode daher erst als Computer für diese Berechnungen verfügbar wurden.<sup>6</sup>

Es handelt sich bei diesen generierten Zahlen nicht um echte Zufallszahlen, wie sie sich bei Zufallsexperimenten (z.B. Roulette) ergeben, sondern um sogenannte Pseudozufallszahlen, die auf Grundlage eines vorgegebenen Algorithmus erzeugt werden. Moderne Softwareprogramme bieten meist die Möglichkeit aus unterschiedlichen Algorithmen (Zufallsgeneratoren) auszuwählen. Durch die Festlegung des Ausgangswerts (engl.: „seed“) für die Ermittlung der Zufallszahlen können Ergebnisse bei unterschiedlichen Simulationsdurchgängen rekonstruiert werden.<sup>7</sup>

Die Methode sollte entweder angewendet werden, wenn grobe approximative Lösungen gefordert sind oder wenn das Problem zu komplex ist, um herkömmliche Methoden anzuwenden.<sup>8</sup>

Möchte man beispielsweise die Verteilung der Summe mehrerer unabhängiger Zufallsvariablen bilden, geschieht dies durch die Faltung der Einzelverteilungen. Bei mehreren Summanden ergeben sich bei der Faltung schnell komplizierte Integrale, die gelöst werden müssen. Werden noch andere Rechenoperationen mit unterschiedlichen Variablen durchgeführt, bei denen einzelne Parameter voneinander abhängig sind (Korrelationen), stößt die mathematische Operation der Faltung schnell an ihre Grenzen. Die Lösung für solche Probleme, wie sie z.B. bei der probabilistischen Kostenkalkulation vorkommen, kann mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation angenähert werden.

<sup>4</sup> Es wurden dabei Zufallsprozesse im Zusammenhang mit der Diffusion von Neutronen in spaltbarem Material simuliert. Vgl. Hengartner/Theodorescu (1978). Einführung in die Monte-Carlo-Methode. S. 12f

<sup>5</sup> Hengartner/Theodorescu (1978). Einführung in die Monte-Carlo-Methode. S. 17

<sup>6</sup> Vgl. Hengartner/Theodorescu (1978). Einführung in die Monte-Carlo-Methode. S. 12f

<sup>7</sup> Ohne einen festgelegten „seed“ weichen die Ergebnisse von unterschiedlichen Simulationsdurchgängen bei unveränderten Inputs und unverändertem Modell immer geringfügig voneinander ab, da mit Zufallswerten gerechnet wird. Durch die Wahl einer größeren Anzahl an Iterationen können die Unterschiede zwischen den Simulationen vermindert werden, da die Ergebnisse immer stabiler werden, je größer die Anzahl an Iterationen ist.

<sup>8</sup> Vgl. Hengartner/Theodorescu (1978). Einführung in die Monte-Carlo-Methode. S. 12

Simulationen werden eingesetzt um den Möglichkeitsraum abzubilden und zu strukturieren.<sup>9</sup>

Es können zwei Arten von Problemen mit dem Verfahren gelöst werden:<sup>10</sup>

- Probleme deterministischer Natur:
  - Berechnungen von bestimmten Integralen
  - Lösung linearer Gleichungssysteme
  - Lösung von Randwert- und Extremalproblemen etc.
- Probleme stochastischer Natur:
  - Lagerhaltungs- und Warteschlangenprobleme
  - Bestimmung der Qualität und Zuverlässigkeit von Erzeugnissen
  - Berechnung von Baukosten und Bauzeiten etc.

Bei Problemen stochastischer Natur besteht die Schwierigkeit darin, die mit dem Problem zusammenhängenden Zufallsprozesse zu erfassen und ein entsprechendes Rechenmodell aufzustellen. Auf Basis des erstellten Modells wird dann mit Hilfe von Zufallszahlen die Simulation durchgeführt.<sup>11</sup>

### 5.3 Einordnung der Methode

Bevor auf wichtige Begriffe im Zusammenhang mit der Monte-Carlo-Simulation und der Ergebnisinterpretation sowie die Funktionsweise und Anwendung eingegangen wird, erfolgt die Einordnung des Verfahrens in die Mathematik.

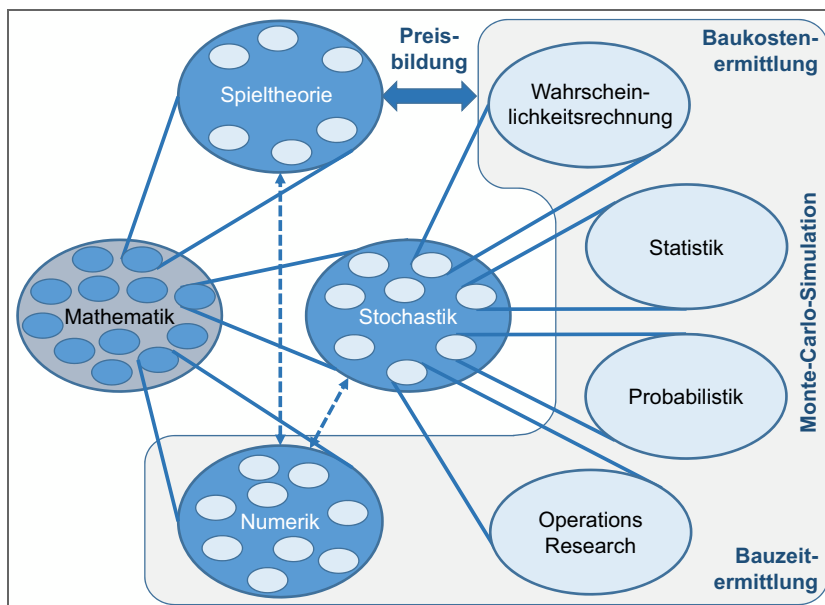


Abb. 5-2 Einordnung der Monte-Carlo-Simulation in die Stochastik bzw. in die Mathematik

<sup>9</sup> Vgl. Gottschalk-Mazouz (2011), Risiko, S. 503

<sup>10</sup> Vgl. Hengartner/Theodorescu (1978), Einführung in die Monte-Carlo-Methode, S. 11

<sup>11</sup> Vgl. Hengartner/Theodorescu (1978), Einführung in die Monte-Carlo-Methode, S. 11f

Die Monte-Carlo-Simulation bedient sich der Wahrscheinlichkeitsrechnung<sup>12</sup>, der Statistik, Probabilistik und wird auch für Verfahren des Operations Research eingesetzt. Es handelt sich dabei um Teilgebiete der Stochastik, die wiederum einen Teilbereich der Mathematik darstellt (siehe Abb. 5-2).

Eine weitere Möglichkeit zur Einordnung in die Teildisziplinen der Mathematik bietet die 2010 Mathematics Subject Classification (MSC2010). Darin sind 62 Hauptkategorien mit insgesamt mehr als 6.130 Unterkategorien definiert. Ziel der MSC2010 ist es, die Literatur der Mathematik so zu klassifizieren, dass Interessierte in einem speziellen Gebiet schnell neue Informationen und Erkenntnisse finden können.<sup>13</sup>

Nachfolgend wird näher auf die angeführten Teilbereiche der Mathematik – mit besonderem Fokus auf die Unterschiede zwischen Determinismus und Probabilismus bzw. Probabilistik – eingegangen.

### 5.3.1 Spieltheorie

Viele ökonomische Fragestellungen weisen im Hinblick auf strategische Entscheidungen folgende Eigenschaften auf:<sup>14</sup>

- (a) das Ergebnis von Entscheidungen hängt von mehreren Entscheidungsträgern ab, sodass ein einzelner das Ergebnis nicht unabhängig von der Wahl der anderen bestimmen kann;
- (b) jeder Entscheidungsträger ist sich dieser Interdependenz bewusst;
- (c) jeder Entscheidungsträger geht davon aus, dass alle anderen sich ebenfalls der Interdependenz bewusst sind;
- (d) jeder berücksichtigt bei seinen Entscheidungen (a), (b) und (c).

Die Spieltheorie bietet ein abstraktes, formales Instrumentarium für die Analyse strategischer Entscheidungssituationen. Sie wird auch als „formale Sprache der ökonomischen Theorie“ betrachtet.<sup>15</sup>

Sie wird als eigener Bereich der Mathematik, auf gleicher Ebene mit der Numerik und der Stochastik gesehen. Während die Monte-Carlo-Simulation in dieser Arbeit für die reine Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten eingesetzt wird, sind z.B. für die Preisbildung weitere strategische Überlegungen notwendig. Durch das Zusammenwirken des erhöhten Informationsgehalts aus der Monte-Carlo-Simulation und den Überlegungen der Spieltheorie kann eine verbesserte Entscheidungsbasis geschaffen werden. Für eine vertiefende Betrachtung entscheidungstheoretischer Grundlagen sowie des Risikonutzenverhaltens von wirtschaftlichen Akteuren sei an dieser Stelle beispielhaft auf die Dissertation von Werkl<sup>16</sup> verwiesen.

### 5.3.2 Determinismus

Unter dem Einfluss der Naturwissenschaften entstand in der Philosophie des 17. Jh. die Vorstellung, dass alles, was in der Welt geschieht, auch mensch-

<sup>12</sup> Zur Wahrscheinlichkeitsrechnung zählt beispielsweise auch die Entscheidungstheorie.

<sup>13</sup> Vgl. <http://www.ams.org/mathscinet/msc/pdfs/classifications2010.pdf>. Datum des Zugriffs: 05.02.2015

<sup>14</sup> Vgl. Holler/Illing (2006). Einführung in die Spieltheorie. S. 1

<sup>15</sup> Vgl. Holler/Illing (2006). Einführung in die Spieltheorie. S. 1

<sup>16</sup> Vgl. Werkl (2013). Risiko- und Nutzenverhalten in der Bauwirtschaft – Eine entscheidungstheoretische Betrachtung im institutionenökonomischen Kontext.

liche Handlungen, durch unabänderliche Naturgesetze bestimmt ist.<sup>17</sup>

Beim Determinismus (von lat. determino: abgrenzen, bestimmen, festlegen) der Philosophie handelt es sich um „die Lehre von der eindeutigen Bestimmtheit allen Geschehens durch Ursachen, aller späteren Ereignisse durch frühere [...]“<sup>18</sup>

„Die Newtonischen Gesetze sind deterministisch. Wenn für ein beliebiges System von Körpern alle Zustandsgrößen im Zeitpunkt  $t_1$  bekannt sind, so lassen sich mittels der mechanischen Gesetze alle Zustandsgrößen in einem beliebigen früheren oder späteren Zeitpunkt  $t_2$  berechnen. Daß die Zustandsgrößen niemals vollständig und absolut genau bekannt sein können, wurde lange Zeit als bloße menschliche Unzulänglichkeit bezeichnet. Durch Fortschritt der Meßtechnik hoffte man, die Zustandsgrößen immer genauer bestimmen zu können. Man nahm an, es bestehe eine Konvergenz der Meßresultate, die auf eine immer genauere Erfassung der an-sich-seienden Werte hinweise [...]. Von der Voraussetzung her, daß alle Naturgesetze mechanischer Art seien und die Welt eine große „Weltmaschine“ darstelle [...], ergab sich der Gedanke einer vollständigen Determiniertheit der Welt. Laplace hat dies durch die Vorstellung einer übermenschlichen Intelligenz<sup>19</sup> illustriert: „Ein Geist, der für einen Augenblick alle Kräfte kennen würde, welche die Natur beleben, und die gegenseitige Lage aller Wesenheiten, aus denen die Welt besteht, müßte, wenn er umfassend genug wäre, um alle diese Daten der mathematischen Analyse unterwerfen zu können, in derselben Formel die Bewegung der größten Himmelskörper und der leichtesten Atome begreifen, nichts wäre ungewiß für ihn, und Zukunft und Vergangenheit läge seinen Augen offen da“.<sup>20</sup>

Bei deterministischen Berechnungen geht man davon aus, dass Ereignisse in der Zukunft eindeutig bestimmt werden können. Unsicherheiten in den Parametern oder im Berechnungsmodell werden nicht berücksichtigt. D.h., dass in die Berechnungen nur deterministische (bestimmte) Zahlenwerte einfließen. Wären Systeme in der Natur tatsächlich deterministisch, müssten Ergebnisse mit 100%iger Wahrscheinlichkeit (also mit Sicherheit) eintreten. Für komplexe Systeme mit zahlreichen Abhängigkeiten – wie die Errichtung eines Bauwerks unter sich ändernden Randbedingungen (z.B. Wetter), mit vielen Beteiligten – kann davon ausgegangen werden, dass deterministisches Verhalten einen theoretischen Sonderfall darstellt. Die Erkenntnis, dass Ereignisse nicht mit absoluter Sicherheit vorhergesagt bzw. berechnet werden können, führte zum Probabilismus bzw. zur mathematischen Probabilistik.

### 5.3.3 Stochastik

Die Stochastik ist die Lehre der Wahrscheinlichkeitstheorie.<sup>21</sup> Die Wahrscheinlichkeitstheorie ist ein Teilbereich der Mathematik (siehe Abb. 5-2), der sich mit den formalen Eigenschaften von Wahrscheinlichkeitsmaßen, Wahrscheinlichkeitsräumen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen befasst.<sup>22</sup> Sie kann auch als „Mathematik des Zufalls“ beschrieben werden.<sup>23</sup>

<sup>17</sup> Vgl. Historisches Wörterbuch der Philosophie – Band 2: D-F (1972). S. 150

<sup>18</sup> Brockhaus GmbH (1999). Brockhaus in fünfzehn Bänden – Band 3 – Chl-Eir. S. 195

<sup>19</sup> auch als „Laplace'scher Dämon“ bezeichnet

<sup>20</sup> Historisches Wörterbuch der Philosophie – Band 2: D-F (1972). S. 155

<sup>21</sup> Vgl. Biermann/Grosser (1999). Taschenlexikon Finanzmathematik/Statistik. S. 174

<sup>22</sup> Vgl. Biermann/Grosser (1999). Taschenlexikon Finanzmathematik/Statistik. S. 196

### 5.3.4 Wahrscheinlichkeitsrechnung

Die Wahrscheinlichkeitsrechnung ist ein Teilgebiet der Stochastik das sich mit der Formalisierung und Modellierung von zufallsbedingten Vorgängen beschäftigt. Für die Definition der Wahrscheinlichkeit gibt es nachfolgende Ansätze:<sup>24</sup>

#### Wahrscheinlichkeit nach Laplace

Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses ist die Anzahl der günstigen Fälle dividiert durch die Anzahl aller möglichen Fälle. Diese Definition ist nur für endliche Verteilungen anwendbar, da die Wahrscheinlichkeit für unendliche Trägermengen zu einem nicht definierten Ausdruck führt. Die Wahrscheinlichkeit nach Laplace ist ein Sonderfall des Kolmogoroff'schen Axiomensystems. Zufall nach Laplace ergibt sich aus Mangel an Wissen bzw. aus Informationsmangel (Laplace'scher Dämon).

#### Wahrscheinlichkeit nach Kolmogoroff

Kolmogoroff definierte die folgenden Axiome:

1. Die Wahrscheinlichkeit ist nicht negativ.
2. Die Wahrscheinlichkeit ist additiv. Schließen sich zwei Ereignisse gegenseitig aus, ist die Wahrscheinlichkeit, dass entweder das eine oder das andere Ereignis eintritt gleich der Summe der Einzelwahrscheinlichkeiten.
3. Die Wahrscheinlichkeit ist normiert. D.h. die Summe der Wahrscheinlichkeit möglicher Ereignisse ist 1.

#### Statistische Definition der Wahrscheinlichkeit

Diese Definition greift auf die relative Häufigkeit zurück, die man beobachtet, wenn man ein Zufallsexperiment (z.B. Münzwurf) wiederholt stochastisch unabhängig durchführt. Die Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis ist damit der Grenzwert (Limes) der relativen Häufigkeit für eine unendliche Wiederholung des Zufallsexperiments (dabei handelt es sich um eine empirische Annahme). Die statistische Definition der Wahrscheinlichkeit ist ebenfalls ein Sonderfall des Kolmogoroff'schen Axiomensystems.

### 5.3.5 Statistik

„Statistik ist die Wissenschaft, die Regeln und Verfahren für die Erhebung, Beschreibung, Analyse und Interpretation von numerischen Daten entwickelt.“<sup>25</sup>

Es wird dabei durch das Messen einer Stichprobe versucht auf die Grundgesamtheit zu schließen.

Die Statistik wird unterteilt in:

- Beschreibende Statistik<sup>26</sup>
- Schließende Statistik<sup>27</sup>
- Univariate Statistik
- Multivariate Statistik

<sup>23</sup> Vgl. Henze (2012). Stochastik für Einsteiger – Eine Einführung in die faszinierende Welt des Zufalls. S. 1

<sup>24</sup> Vgl. Biermann/Grosser (1999). Taschenlexikon Finanzmathematik/Statistik. S. 193ff

<sup>25</sup> Czado/Schmidt (2011). Mathematische Statistik – Statistik und ihre Anwendungen. S. 1

<sup>26</sup> Auch deskriptive oder deduktive Statistik genannt.

<sup>27</sup> Auch induktive Statistik genannt.

Die beschreibende Statistik hat zum Ziel, eine bestimmte Gruppe (Stichprobe) auf ihre Merkmale hin zu beschreiben und zu analysieren, ohne Schlüsse auf eine andere Gruppe oder auf die Grundgesamtheit zu ziehen. Es werden die gesammelten Daten in Form von Grafiken und Diagrammen aufbereitet.<sup>28</sup>

Bei der schließenden Statistik wird versucht aufgrund von (unvollständigen) Informationen aus einer Stichprobe auf die umfassende Grundgesamtheit zu schließen.<sup>29</sup>

Die univariate Statistik beschäftigt sich lediglich mit eindimensionalen Zufallsvariablen. Es gibt also nur ein Merkmal pro statistischer Einheit (z.B. die Größe von befragten Personen).<sup>30</sup>

Im Rahmen der multivariaten Statistik wird untersucht, ob verschiedene Merkmale der untersuchten statistischen Einheiten miteinander in Beziehung stehen (korrelieren) oder ob sie voneinander unabhängig sind (z.B. die Größe und das Körpergewicht von befragten Personen).<sup>31</sup>

### 5.3.6 Probabilistik/Probabilismus

In der Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie beschreibt der Probabilismus (von lat. probabilis: annehmbar, wahrscheinlich, glaubhaft<sup>32</sup>) „die Auffassung, dass es keine absolut wahren, sondern nur wahrscheinliche Sätze gibt. – In quantenphysikal. Theorien drückt der P. aus, dass gewisse Ereignisse nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorhersehbar sind.“<sup>33</sup>

„Mit dem Adjektiv „probabilistisch“ bezeichnet man [...] empirische Theorien, die sich wahrscheinlichkeitstheoretischer Konzepte oder statistischer Methoden bedienen. Der probabilistische Charakter einer wissenschaftlichen Theorie kann dabei einerseits mit dem Grad der Glaubwürdigkeit einer subjektiven Überzeugung im Hinblick auf eine vorliegende Datenmenge zusammenhängen, andererseits aber auch mit objektiven Eigenschaften der zu erklärenden Gegenstände oder Prozesse selbst. Probabilistisches Denken hat sich im 19. und frühen 20. Jh. in den Sozial- und Naturwissenschaften auf unterschiedliche Weise stark verbreitet und führte zu grundlegenden Zweifeln am Laplaceschen Determinismus [...]. Dieser Prozeß wird [...] als „probabilistische Revolution“ bezeichnet.“<sup>34</sup>

Voigt<sup>35</sup> sieht die Probabilistik als Teilgebiet der Stochastik, auf gleicher Ebene wie die Statistik und die Kombinatorik<sup>36</sup> (siehe Abb. 5-3).

Bei probabilistischen Systemen ist es demnach nicht möglich ein zukünftiges Ereignis eindeutig vorherzusagen. Es kann nur eine Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis (z.B. die Kosten für Stahlbetonarbeiten) angegeben werden.

<sup>28</sup> Vgl. Biermann/Grosser (1999). Taschenlexikon Finanzmathematik/Statistik. S. 22

<sup>29</sup> Vgl. Biermann/Grosser (1999). Taschenlexikon Finanzmathematik/Statistik. S. 83

<sup>30</sup> Vgl. Biermann/Grosser (1999). Taschenlexikon Finanzmathematik/Statistik. S. 185

<sup>31</sup> Vgl. Biermann/Grosser (1999). Taschenlexikon Finanzmathematik/Statistik. S. 126f

<sup>32</sup> Vgl. Stowasser et al. (1998). Stowasser. S. 404

<sup>33</sup> Brockhaus GmbH (1999). Brockhaus in fünfzehn Bänden – Band 11 – Pfe-Rog. S. 196

<sup>34</sup> Historisches Wörterbuch der Philosophie – Band 7: P-Q (1989). S. 1389

<sup>35</sup> Vgl. Voigt (2008). Grundlagen der Probabilistik. Folie 3

<sup>36</sup> Auf die Kombinatorik wird in weiterer Folge nicht näher eingegangen.

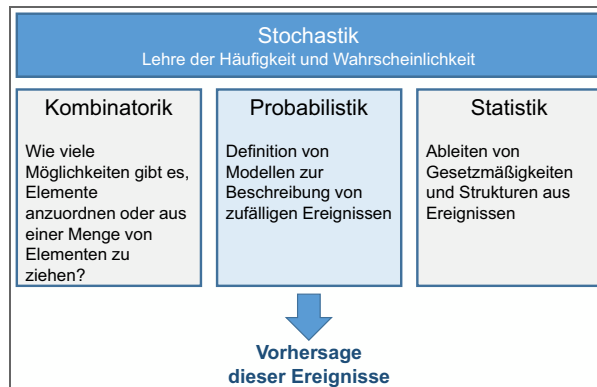


Abb. 5-3 Begriffsdefinition – Stochastik, Statistik, Probabilistik, Kombinatorik<sup>37</sup>

Für die Verwendung der Begriffe wird empfohlen, zufällige natürliche Ereignisse oder Prozesse als stochastisch und die mathematische Analyse solcher Prozesse und deren Auswirkungen als probabilistisch zu bezeichnen.<sup>38</sup>

### 5.3.7 Operations Research

Unter Operations Research (OR) wird allgemein die Entwicklung und der Einsatz quantitativer Modelle und Methoden zur Entscheidungsunterstützung in Unternehmen und Organisationen verstanden. Typische Werkzeuge des OR sind Optimierungen und Simulationen.<sup>39</sup>

Der mit dem Operations Research oft in Verbindung stehende Begriff „Management Science“ wird insbesondere in Nordamerika für „praktisches Operations Research“ verwendet. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Unterstützung von Führungskräften bei Entscheidungen. Nicht gemeint ist damit die Entwicklung von formal-mathematischen Methoden, sondern deren reine Anwendung.<sup>40</sup>

### 5.3.8 Numerik

In der Numerik (numerische Mathematik) geht es in der Regel um die näherungsweise Berechnung von Lösungen (für Gleichungen oder z.B. Funktionswerte oder Integrale) mit Hilfe von Computern.

Die Numerik gilt als ein eigener Fachbereich der Mathematik, auf gleicher Ebene wie die Stochastik (siehe Abb. 5-2). Wird mit Zahlen operiert und werden numerische Berechnungen durchgeführt, kommen Elemente der Numerik zum Einsatz. Sie beschäftigt sich mit der Konstruktion und Analyse von Algorithmen für kontinuierliche mathematische Probleme. Hauptanwendung ist die approximative Berechnung von Lösungen mit Hilfe von Computern. Dies geschieht aus zwei möglichen Gründen:<sup>41</sup>

<sup>37</sup> Vgl. Voigt (2008). Grundlagen der Probabilistik. Folie 3

<sup>38</sup> Vgl. <http://www.businessdictionary.com/definition/probabilistic.html>. Datum des Zugriffs: 07.05.2014

<sup>39</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 5

<sup>40</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 6

<sup>41</sup> Vgl. Knorrenschild (2013). Numerische Mathematik – Eine beispielorientierte Einführung. S. 9



- Die Größen sind auf dem Papier nicht exakt berechenbar.
- Die Größen sind zwar auf dem Papier exakt bestimmbar, aber die Anwendung erfordert, diese wiederholt und zuverlässig in kurzer Zeit zur Verfügung zu stellen, sodass eine Rechnung von Hand nicht in Frage kommt.

Damit ist die Monte-Carlo-Simulation sowohl der Numerik als auch der Stochastik zuzuordnen, da dabei mit Zufallszahlen operiert wird. Es handelt sich bei der Monte-Carlo-Simulation um ein numerisches Verfahren der Stochastik.

## 5.4 Software

Für die Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen ist eine entsprechende Software erforderlich. Diese kann entweder individuell entwickelt werden oder es wird eine kommerzielle Softwarelösung eingesetzt. Aufgrund des erhöhten Aufwands und der erforderlichen vertieften Kenntnisse in der Softwareentwicklung und Programmierung wird für diese Arbeit ein bestehendes Programm verwendet, mit dem die Berechnungen und Simulationen durchgeführt werden.

Bei den kommerziellen Programmen handelt es sich meist um Add-Ins für MS Excel, die auf die bekannten Funktionen und die vertraute Benutzeroberfläche von MS Excel zugreifen und aufbauen. Eine demonstrative Auflistung verfügbarer Softwareprogramme, die als Excel Add-Ins fungieren inkl. der Hersteller sind in Tab. 5-1 angeführt.

Programme	Hersteller
@Risk	Palisade
Crystal Ball	Oracle
Risk Solver	Frontline Systems
DFSS Master	SigmaZone
RiskAMP	Structured Data
Risk Analyzer	Add-ins.com

**Tab. 5-1** Gängige kommerzielle Softwareprogramme für die Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen

Für die vorliegende Arbeit wurde die Software @Risk eingesetzt, da es für dieses Programm einen umfangreichen Support<sup>42</sup> durch die Entwickler gibt, zahlreiche Beispiele und Fragenbeantwortungen online verfügbar sind, die Software am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz bereits eingesetzt wurde und der Verfasser im Umgang mit dem Programm schon Erfahrungen sammeln konnte. Die Modellbildung erfolgt in MS Excel über bekannte Befehle und mathematische Verknüpfungen. Das Erlernen einer Programmiersprache ist nicht erforderlich, VBA<sup>43</sup> Makros können jedoch bei Bedarf eingesetzt werden. Zusätzliches Kriterium für die gewählte Software ist der Umstand, dass es sich bei dem Programm @Risk um einen Teil eines

<sup>42</sup> Die Palisade Corporation veranstaltet weltweite Schulungen, Seminare sowie Konferenzen und bietet die Möglichkeit, direkten Kontakt zu den Software-Trainern und -Entwicklern herzustellen.

<sup>43</sup> VBA ... Visual Basic for Applications

Programmpakets („Decision Tool Suite“) handelt, welches zusammen mit dem Programm „RiskOptimizer“ auch die Lösung probabilistischer Optimierungsprobleme zulässt.

## 5.5 Begriffe

Nachfolgend werden wichtige Begriffe näher erläutert, die für das Verständnis von Monte-Carlo-Simulationen sowie die Interpretation von Ergebnissen erforderlich sind.

Für die Definition grundlegender statistischer Größen (z.B. Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Modus, Erwartungswert) wird an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen (Beispiele: Sachs L.<sup>44</sup>; Sachs M.<sup>45</sup>; Bortz/Schuster<sup>46</sup>; Bley Müller<sup>47</sup> etc.).

### 5.5.1 Zufallsvariable

Eine Zufallsvariable ist eine Variable, die in Abhängigkeit vom Eintreten eines zufälligen Ereignisses einen davon abhängigen Wert annimmt. Ist eine Variable von einer Zufallsvariable funktional abhängig, ist sie ebenfalls eine Zufallsvariable.<sup>48</sup>

Zufallsvariablen sind in einer probabilistischen Berechnung alle jene Parameter, die mit Unsicherheiten behaftet sind und nicht als einzelne Zahlenwerte (deterministisch), sondern als Verteilungen in die Berechnungen einfließen.

### 5.5.2 Verteilung

Eine (Wahrscheinlichkeits-)Verteilung gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Zufallsvariable (z.B. der Aufwandswert für das Schalen) gewisse Ausprägungen annehmen kann. Eine Verteilung ist durch ihre Dichte<sup>49</sup> bestimmt.<sup>50</sup>

Die Dichte einer diskreten Zufallsvariable ordnet jedem Wert die entsprechende Wahrscheinlichkeit zu, mit der dieser auftritt. Eine diskrete Dichte ist tabellarisch darstellbar, sofern die Anzahl der Träger<sup>51</sup> nicht unendlich ist. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten muss 1 ergeben.

Die Dichte einer stetigen Zufallsvariable ist eine intervallweise stetige Funktion (d.h. dass der Graph dieser Funktion intervallweise keine „Lücken“ aufweist). Die tabellarische Darstellung von stetigen Dichten ist nicht möglich, da der Träger überabzählbar viele Elemente hat. Das Integral über die gesamte Verteilung (von  $-\infty$  bis  $+\infty$ ) muss 1 ergeben (siehe drittes Axiom – Wahrscheinlichkeit nach Kolmogoroff – Abschnitt 5.3.4).<sup>52</sup>

<sup>44</sup> Sachs (2004). Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden.

<sup>45</sup> Sachs (2013). Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik für Ingenieurstudenten an Fachhochschulen.

<sup>46</sup> Bortz/Schuster (2010). Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.

<sup>47</sup> Bley Müller (2012). Statistik für Wirtschaftswissenschaftler.

<sup>48</sup> Vgl. Biermann/Grosser (1999). Taschenlexikon Finanzmathematik/Statistik. S. 210

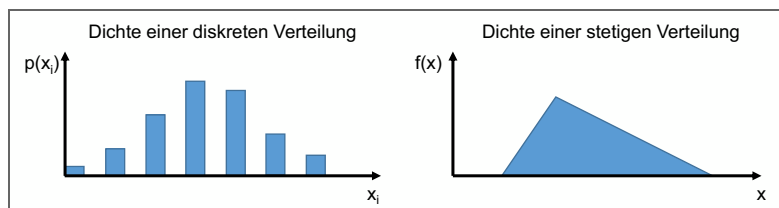
<sup>49</sup> Auch als Dichtefunktion oder Wahrscheinlichkeitsfunktion bezeichnet.

<sup>50</sup> Vgl. Biermann/Grosser (1999). Taschenlexikon Finanzmathematik/Statistik. S. 190

<sup>51</sup> Fasst man alle Elemente einer Menge – die bezüglich einer bestimmten Verteilung eine positive Wahrscheinlichkeit aufweisen – zusammen, erhält man den Träger dieser Verteilung.

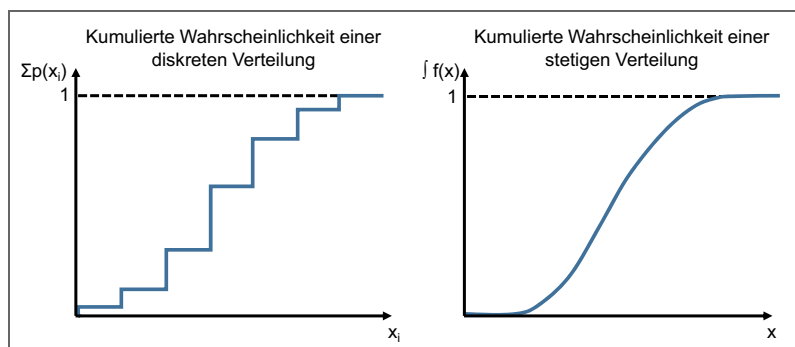
<sup>52</sup> Vgl. Biermann/Grosser (1999). Taschenlexikon Finanzmathematik/Statistik. S. 40f

Die Dichtefunktionen einer diskreten und einer stetigen Funktion sind in Abb. 5-4 qualitativ dargestellt.



**Abb. 5-4** Dichtefunktion einer diskreten (links) und einer stetigen Verteilung (rechts) – qualitative Darstellung

Verteilungen können auch als Summenkurven dargestellt werden, indem die Häufigkeiten der einzelnen Werte aufsummiert (kumuliert) werden (siehe Abb. 5-5).



**Abb. 5-5** Kumulative Wahrscheinlichkeitsfunktion einer diskreten (links) und einer stetigen Verteilung (rechts) – qualitative Darstellung

Auf die Wahl von Verteilungsfunktionen für die Berechnung von Baukosten und Bauzeiten mit Hilfe von probabilistischen Berechnungsverfahren wird in Abschnitt 5.10 näher eingegangen.

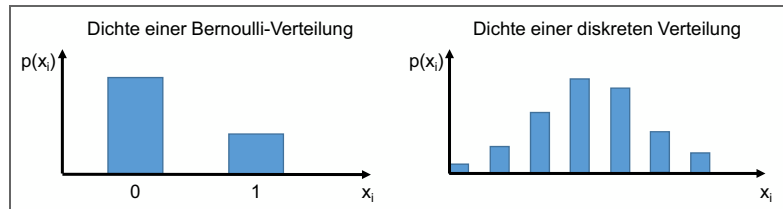
### 5.5.2.1 Diskrete Verteilungen

Diskrete Verteilungen sind dann sinnvoll anwendbar, wenn die entsprechenden Parameter nur einzelne Zahlenwerte – diese müssen nicht ganzzahlig sein – annehmen können (beispielhaft siehe Abb. 5-6 – rechts). Beispielsweise könnte die tägliche Arbeitszeit zwischen 8 und 12 Stunden betragen, wobei eine Unterteilung der Intervalle mit einer Schrittweite von einer halben Stunde denkbar ist.

Auch die Anzahl der einsetzbaren Krane könnte über eine diskrete Verteilung modelliert werden. So wäre beispielsweise der Einsatz von 2, 3 oder 4 Kranen für eine Baustelle denkbar.

In @Risk kann durch die Eingabe der Excel-Funktion (RUNDEN) eine stetige Verteilung sehr einfach in eine ganzzahlige diskrete Verteilung umgewandelt werden. Dabei werden die Zwischenwerte entsprechend mathematisch auf- oder abgerundet und die weiteren Berechnungen erfolgen nur noch mit den gerundeten Werten.

Eine spezielle Form diskreter Verteilungen ist die Bernoulli-Verteilung (siehe Abb. 5-6 – links). Diese kennt nur zwei Zustände (0 oder 1) und eignet sich daher bestens, um den Eintritt bestimmter Ereignisse zu simulieren. Ein Risiko oder ein Produktivitätsverlust kann entweder eintreten (= 1) oder er bleibt aus (= 0).<sup>53</sup>



**Abb. 5-6** Dichtefunktion einer Bernoulli-Verteilung (links) und einer allgemeinen diskreten Verteilung (rechts) – qualitative Darstellung

### 5.5.2.2 Stetige Verteilungen

Stetige Verteilungen werden dann angesetzt, wenn innerhalb eines gewissen Bereichs (Bandbreite) alle möglichen Zahlenwerte vorkommen können. Diese Annahme kann z.B. bei Kostenwerten oder aber bei Aufwands- und Leistungswerten die Realität gut abbilden. Natürlich sind Euro-Beträge auf mehr als zwei Nachkommastellen nicht realisierbar. Alle möglichen Euro-Beträge innerhalb einer gewissen Bandbreite jedoch mittels einer diskreten Verteilung abzubilden, bedeutet einen erhöhten (und unnötigen) Aufwand für die Modellierung, weshalb dafür stetige Verteilungen zur Anwendung kommen.

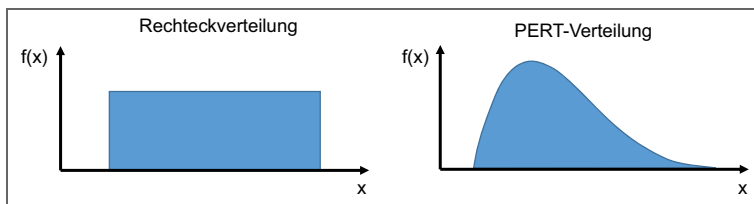
Ist die Form der Verteilung von Inputparametern nicht bekannt, bieten sich Dreiecksverteilungen (siehe z.B. Abb. 5-4 – rechts) als theoretischer Ansatz an. Diese wirken auf den ersten Blick recht künstlich und werden für Vorgänge oder Ereignisse in der Realität auch nicht anzutreffen sein. Für die Wahl von Dreiecksverteilungen spricht jedoch deren Definition über lediglich drei Werte (minimaler, erwarteter und maximaler Wert), die von ExpertInnen leicht abgeschätzt werden können.

Für Leistungs-, Aufwands- und Kostenparameter werden häufig schiefe Verteilungen angesetzt. Dies begründet sich einerseits dadurch, dass die menschliche Leistungsfähigkeit tendenziell asymmetrische Verteilungen annimmt, andererseits durch das wirtschaftliche Minimalprinzip, wobei durch einen möglichst geringen Mitteleinsatz versucht wird das geforderte Ergebnis zu erzielen. Die Tendenz geht dabei hin zu rechtsschiefen (linkssteilen) Verteilungen.<sup>54</sup>

Weitere Beispiele für (geschlossene) stetige Verteilungen sind Rechteck- und PERT-Verteilungen (siehe Abb. 5-7).

<sup>53</sup> Mögliches Anwendungsbeispiel: Im Chancen-Risiko-Management für eine probabilistische Erweiterung der Praktiker-methode, bei der die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkung miteinander multipliziert werden.

<sup>54</sup> Eine ähnliche Auffassung im Hinblick auf Vorgangsdauern findet sich bei Rohr (2005). Optimierung der Bauproduktion durch Simulation von Prozessen. S. 44  
Im Hinblick auf die Kosten bei Chau (1995a). The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. S. 17



**Abb. 5-7** Dichtefunktion einer Rechteckverteilung (links) und einer PERT-Verteilung (rechts) – qualitative Darstellung

### 5.5.2.3 Offene/geschlossene Verteilungen

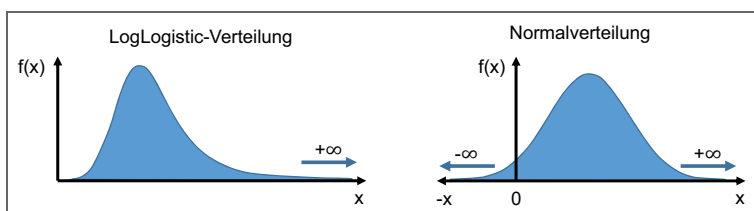
Unter „geschlossenen“ Verteilungen werden jene verstanden, die ein definiertes, endliches Minimum und ein definiertes, endliches Maximum aufweisen. Beispiele für geschlossene Verteilungen sind etwa Rechteck-, Dreiecks- oder PERT-Verteilungen.

Bei „offenen“ Verteilungen muss zwischen einseitig und beidseitig offenen Verteilungen unterschieden werden. Handelt es sich um eine beidseitig offene Verteilung, gibt es weder ein endliches Minimum noch ein endliches Maximum. Beide Enden reichen bis  $-\infty$  bzw.  $+\infty$ .

Beispiele für einseitig offene Verteilungen sind Gamma-, LogLogistic-, Weibull- oder Exponentialverteilungen.

Beidseitig offene Verteilungen sind beispielsweise Normal-, Laplace- und Student-Verteilungen.

In Abb. 5-8 sind eine einseitig offene (links) und eine beidseitig offene Verteilung (rechts) qualitativ dargestellt.



**Abb. 5-8** Dichtefunktion einer LogLogistic-Verteilung (links) und einer Normalverteilung (rechts) – qualitative Darstellung

Bei offenen Verteilungen haben sehr hohe bzw. sehr niedrige Werte eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit. Für baubetriebliche und bauwirtschaftliche Berechnungen ist der Ansatz von offenen Verteilungen als Inputparameter in der Regel nicht zielführend, da meist eine geschlossene Bandbreite für die Eingangsparameter angegeben werden kann. Auch negative Werte werden in den meisten Fällen nicht sinnvoll in die Berechnungen einzusetzen sein.

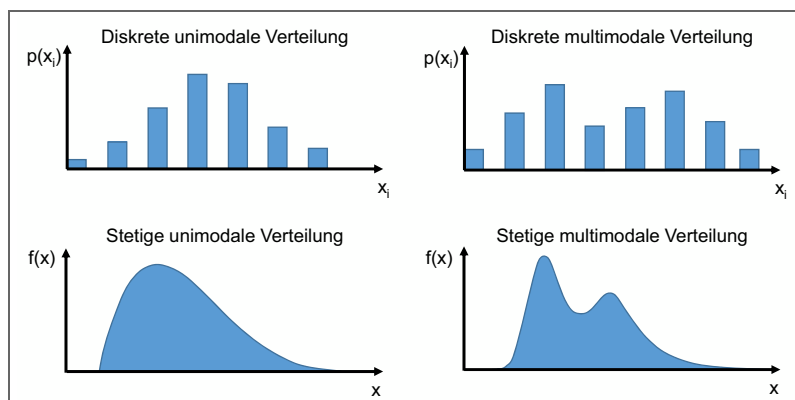
### 5.5.2.4 Unimodale/multimodale Verteilungen

Bei nicht konstanten Verteilungen wird in uni- und multimodale Verteilungen unterschieden. Hat die Dichtefunktion nur ein Maximum, spricht man von einer unimodalen Verteilung (z.B. Normal-, LogLogistic-, PERT-, Dreiecksver-

teilungen). Weisen mehrere Werte innerhalb einer gegebenen Bandbreite eine höhere Wahrscheinlichkeit auf – gibt es also mehr als ein Maximum – handelt es sich um eine multimodale Verteilung. Beispiele für uni- und multimodale Verteilungen sind in Abb. 5-9 qualitativ dargestellt.

Eine Sonderform der multimodalen (mehrgipfligen) Verteilungen sind bimodale (zweigipflige) Verteilungen.

Multimodalität weist auf eine geschichtete Stichprobe hin. Multimodale Verteilungen können sich beispielsweise bei der Aggregation von Produktivitätsverlusten ergeben, wenn im Zuge einer Monte-Carlo-Simulation bei unterschiedlichen Iterationen einzelne Produktivitätsverluste einmal auftreten und einmal nicht. Es ist dann ein Grenzzustand erreicht, bei dem die Anzahl der eintretenden Produktivitätsverluste nicht eindeutig ist. Näheres zur Aggregation von Produktivitätsverlusten findet sich in Abschnitt 4.10.

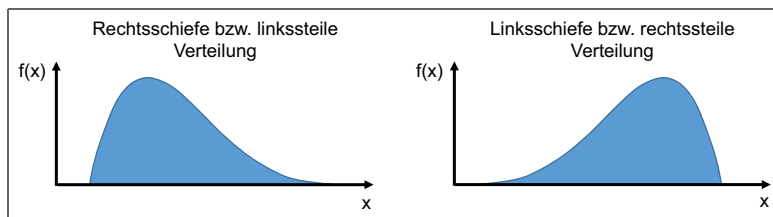


**Abb. 5-9** Dichtefunktion diskreter (oben) und stetiger (unten) unimodaler (links) und multimodaler (rechts) Verteilungen – qualitative Darstellung

### 5.5.2.5 Schiefe/symmetrische Verteilungen

Bei der Form von Verteilungen kann weiters in symmetrische oder schiefe Verteilungen unterschieden werden. Symmetrische Verteilungen haben eine vertikale Spiegelungsachse (siehe z.B. Normalverteilung in Abb. 5-8). Schiefe Verteilungen weisen entweder eine Akkumulation im Bereich des Minimums (= rechtsschief bzw. linkssteil) oder im Bereich des Maximums (= linksschief bzw. rechtssteil) auf (siehe Abb. 5-10).

- Für rechtsschiefe/linkssteile Verteilungen gilt:  
Modalwert < Median < Mittelwert
- Für linksschiefe/rechtssteile Verteilungen gilt:  
Mittelwert < Median < Modalwert

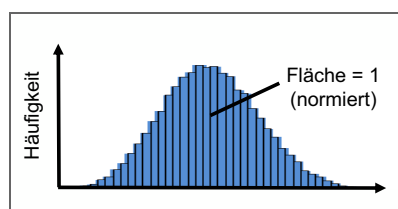


**Abb. 5-10** Dichtefunktion einer rechtsschiefen bzw. linkssteilen (links) und einer linksschiefen bzw. rechtssteilen Verteilung (rechts) – qualitative Darstellung

### 5.5.3 Histogramm

Für die Erhebung eines stetigen Merkmals ist es im Allgemeinen nötig, eine Diskretisierung dieses Merkmals vorzunehmen – dies geschieht durch die Bildung von Klassen. Die Darstellung der Klassenhäufigkeiten (Ordinate) in Form von Flächen über den Klassen (Abszisse) wird als Histogramm bezeichnet. Die Höhe der Rechtecke lässt keine Aussage über die Häufigkeit zu. Diese wird nur über die Fläche (Klassenbreite mal Balkenhöhe) ausgedrückt.

Die Summe der Balkenflächen ist auf 1 normiert (siehe auch drittes Axiom – Wahrscheinlichkeit nach Kolmogoroff – Abschnitt 5.3.4)



**Abb. 5-11** Histogramm – qualitative Darstellung

### 5.5.4 Lageparameter

Lageparameter werden in der deskriptiven Statistik dazu genutzt, die zentrale Lage bzw. den Mittelpunkt einer Verteilung näher zu beschreiben. Sie verdichten dabei die eine Stichprobenelemente bzw. Elemente der Grundgesamtheit zu einer einzelnen Zahl zusammen. Die wichtigsten sind der Mittelwert, der Modalwert und der Median.<sup>55</sup>

#### Mittelwert

Der Mittelwert (oder kurz: Mittel) ist ein Lageparameter einer Stichprobe und kann je nach Aufgabenstellung auf unterschiedliche Arten definiert werden. Am weitesten verbreitet und auch für die Berechnungen dieser Arbeit durchwegs angewandt ist der arithmetische Mittelwert, der auch als Durchschnitt oder einfach nur das Mittel bezeichnet wird.

Er ist besonders bei kleinen Stichproben sehr anfällig für mögliche Ausreißer, weshalb bei der Mittelwertbildung in der Regel eine Ausreißerbereinigung durchgeführt werden muss. Eine Möglichkeit auch weiter vom Mittelwert

<sup>55</sup> Vgl. <http://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/80/lageparameter/>. Datum des Zugriffs: 24.08.2015

entfernte Angaben z.B. von ExpertInnen an die Mitte „heranzuholen“ ist die M-Schätzer Methode nach Huber. Dabei fließen Ausreißer und Extremwerte mit geringerem Gewicht in den Mittelwert ein (siehe Abschnitt 5.5.5).

### Modalwert

Der Modalwert wird auch noch wie folgt bezeichnet:

- Modus
- häufigster Wert
- erwarteter Wert
- ExpertInnenwert
- wahrscheinlichster Wert
- Planwert<sup>56</sup>

„Der häufigste Wert oder Modalwert oder Modus ist diejenige Merkmalsausprägung mit der größten (absoluten oder relativen) Häufigkeit. Bei klassierten Daten ist die Modalklasse diejenige Klasse mit der größten Besetzungsdichte.“<sup>57</sup>

Der Modus bildet damit das Maximum der Dichtefunktion.

### Median

Der Median (auch: Zentralwert) beschreibt jenen Wert einer Verteilung, bei dem 50 % der Werte kleiner und 50 % der Werte größer sind. Durch den Median wird also eine Verteilung in zwei gleich große Flächen unterteilt. Bei symmetrischen Verteilungen entspricht der Median dem arithmetischen Mittelwert. Verglichen mit dem arithmetischen Mittel ist der Median stabiler gegenüber Ausreißern, d.h. diese beeinflussen die Höhe des Medians nicht so stark wie den arithmetischen Mittelwert.<sup>58</sup>

### Erwartungswert

Der Erwartungswert  $E(X)$  (bzw.  $\mu$ ) kann als jene Zahl interpretiert werden, die die Zufallsvariable im Mittel annimmt. Wird der Mittelwert aus den Ergebnissen eines Versuchs gebildet, konvergiert der Mittelwert gegen den Erwartungswert. Der Erwartungswert stellt eine Größe dar, mit der bei einer großen Anzahl an Versuchen zu rechnen ist.

Bei einer unendlichen Anzahl an Wiederholungen eines Zufallsexperiments entspricht der arithmetische Mittelwert der Ergebnisse dem Erwartungswert der Verteilung. D.h. der Stichprobenmittelwert einer Zufallsvariablen nähert sich mit steigender Stichprobengröße dem Erwartungswert an (Gesetz der großen Zahlen).

„Die Schätzfunktion für den Erwartungswert ist das arithmetische Mittel.“<sup>59</sup>

### Zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Lageparameter

In der nachfolgenden Abbildung werden die Lageparameter (Mittelwert, Modalwert und Median) anhand von schiefen Verteilungen qualitativ dargestellt. Bei rechtsschiefen unimodalen Verteilungen (siehe Abb. 5-12 – links) nimmt der Modalwert einen kleineren und der Mittelwert einen größeren

<sup>56</sup> Vgl. Oepen et al. (2012). Risikoorientierte Bauprojekt-Kalkulation. S. 49

<sup>57</sup> Sachs (2013). Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. 4. Auflage. S. 35

<sup>58</sup> Vgl. Bartsch (2004). Taschenbuch Mathematischer Formeln. S. 667

<sup>59</sup> Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 283



Zahlenwert als der Median auf der Abszisse an. Bei linksschiefen Verteilungen ist dies genau umgekehrt (siehe Abb. 5-12 – rechts).

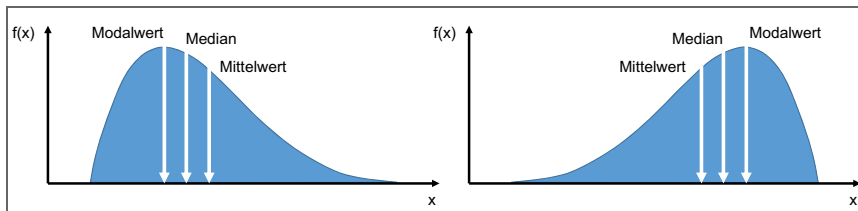


Abb. 5-12 Lageparameter bei schiefen Verteilungen – qualitative Darstellung

### 5.5.5 M-Schätzer nach Huber

Beim M-Schätzer nach Huber handelt es sich um einen robusten Lageparameter, der weniger anfällig für Verzerrungen durch Ausreißer oder Extremwerte ist als z.B. der arithmetische Mittelwert. Bei der Bildung des M-Schätzers nach Huber werden die erhobenen Werte entsprechend einer Funktion (siehe Abb. 5-13) unterschiedlich stark gewichtet.<sup>60</sup>

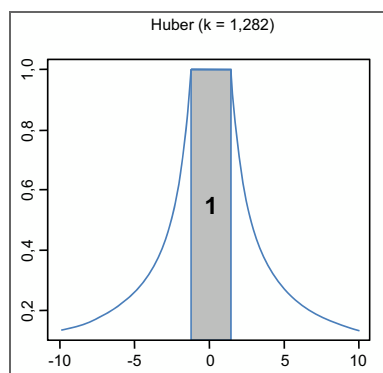


Abb. 5-13 M-Schätzer nach Huber – qualitative Darstellung<sup>61</sup>

Damit fließen Ausreißer und Extremwerte mit geringem Gewicht in die Mittelwertbildung ein und müssen nicht eliminiert werden. Der Bereich, in dem Werte voll (mit 1 gewichtet) in die Berechnung einfließen wird mittels einer Tuningkonstante  $k$  bestimmt. Tab. 5-2 zeigt eine Übersicht über gebräuchliche  $k$ -Werte für die M-Schätzer Methode nach Huber. Welcher  $k$ -Wert bei der Datenanalyse angesetzt wird, hängt von der Anzahl, Entfernung und Art der Verteilung der Ausreißer und Extremwerte sowie von inhaltlichen Überlegungen des Forschers ab.<sup>62</sup>

<sup>60</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 105ff

<sup>61</sup> Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 106

<sup>62</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 105ff

M-Schätzer nach Huber	H19	H16	H12	H8
Tuningkonstante k	1,960	1,645	1,282	0,842
Voll gewichteter Bereich bei der Mittelwertbildung	~ 95 %	~ 90 %	~ 80 %	~ 60 %

Tab. 5-2 Tuningkonstante k für die M-Schätzer nach Huber („Huber Proposal 2“)<sup>63</sup>

### 5.5.6 Zentraler Grenzwertsatz

Für die Summe einer großen Zahl an Zufallsvariablen – unabhängig von der Art der Verteilung einer einzelnen Variablen – ergibt sich im Grenzfall (n geht gegen unendlich) immer (annähernd) eine Normalverteilung. Vorausgesetzt, dass die einzelnen Zufallsvariablen stochastisch unabhängig sind. Für das Produkt mehrerer Zufallsvariablen ergibt sich für den Grenzfall (n geht gegen unendlich) immer (annähernd) eine logarithmische Normalverteilung. Vorausgesetzt, dass die einzelnen Zufallsvariablen stochastisch unabhängig sind.<sup>64</sup>

Es kann keine „echte“ Normalverteilung (im Sinne einer beidseitig offenen Verteilung) durch die Addition mehrerer Zufallsvariablen entstehen, wenn die Summanden nur aus begrenzten Verteilungen bestehen. Gleiches gilt auch für die Log-Normalverteilung<sup>65</sup> als Produkt mehrerer Zufallsvariablen. Sind die Eingangsparameter durch begrenzte Verteilungen definiert, werden auch die Summe und das Produkt dieser – unabhängig von der Anzahl der Variablen – endliche Werte aufweisen.

### 5.5.7 Gauß'sches Fehlerfortpflanzungsgesetz

Wird die Summe aus mehreren Zufallsvariablen gebildet, zeigt sich, dass die Bandbreite der Ergebnisse, bezogen auf die Standardabweichung der Summe, immer enger wird, je mehr Summanden in die Berechnung einfließen.

Dieser Zusammenhang ist auch mathematisch durch das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz begründet. Dabei ist die Zielgröße y eine Funktion f(x<sub>i</sub>) die von mehreren Variablen (x<sub>i</sub>) abhängig ist. Vorausgesetzt wird, dass diese Variablen unabhängig voneinander (unkorreliert) sind. Weiters müssen die Mittelwerte und die Standardabweichungen jeder Variablen (x<sub>i</sub>) bekannt sein. Die Standardabweichung von y kann dann näherungsweise wie folgt ermittelt werden:

$$s_y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f(\bar{x}_i)}{\partial x_i} \right)^2 \cdot s_{x_i}^2} \quad (5-1)$$

mit: i = 1, 2, ... , m

Wird also die Summe aus mehreren Summanden gebildet, stellt sich die Funktion für y folgendermaßen dar:

$$y = f(\bar{x}_i) = \sum_{i=1}^m x_i \quad (5-2)$$

<sup>63</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 107

<sup>64</sup> Vgl. Lederer (1982). Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung. S. 58f

<sup>65</sup> Log-Normalverteilung = logarithmische Normalverteilung

Anhand eines Beispiels werden die Ergebnisse, die sich aus der Summierung von Dreiecksverteilungen (MIN: 800; ERW: 1.000; MAX: 1.200) ergeben, rechnerisch nachvollzogen und mit den Ergebnissen einer Monte-Carlo-Simulation verglichen.

Der Mittelwert beträgt demnach für alle Variablen 1.000 und die Standardabweichung kann für diese Dreiecksverteilungen anhand folgender Gleichung mit 81,65 ermittelt werden:

$$s = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 - ab - ac - bc}{18}} \tag{5-3}$$

mit:

- a ..... Minimalwert (hier: 800)
- b ..... Erwarteter Wert (hier: 1.000)
- c ..... Maximalwert (hier: 1.200)

Die partiellen Ableitungen in Glg. (5-1) ergeben sich für die Summe aus mehreren Variablen jeweils zu 1, somit errechnet sich die Standardabweichung ( $s_y$ ) der Zielgröße y aus der Wurzel der quadrierten und summierten Standardabweichungen der Variablen. Beispielweise hier für 5 Variablen dargestellt.<sup>66</sup>

$$s_y = \sqrt{81,65^2 + 81,65^2 + 81,65^2 + 81,65^2 + 81,65^2} = 182,574$$

Im Vergleich zum Ergebnis der Simulation (182,61) ist hier nur eine sehr geringe Differenz festzustellen. Die weiteren Standardabweichungen aus der mathematischen Berechnung sowie aus den Simulationen sind einander für die Summe aus mehreren Variablen in Tab. 5-3 gegenübergestellt. Weiters sind die Differenzen ja nach Anzahl der Versuche in einer eigenen Spalte (D) angeführt. Es ist zu erkennen, dass die Unterschiede sehr gering ausfallen und damit eine gute Annäherung der Simulation zum tatsächlichen mathematischen Ergebnis gegeben ist.

Standardabweichungen – Summe (Dreiecksverteilungen)				
Lfd. Nr.	Anzahl der Variablen	Berechnung	Simulation	Differenz
0	A	B	C	D
1	1	81,65	81,65	0,00
2	2	115,47	115,56	0,09
3	5	182,57	182,61	0,03
4	10	258,20	257,84	-0,36
5	15	316,23	315,86	-0,37
6	20	365,15	364,10	-1,05
7	50	577,35	578,56	1,21
8	100	816,50	818,10	1,60
9	200	1.154,70	1.158,66	3,96
10	500	1.825,74	1.831,22	5,48
11	1.000	2.581,99	2.585,54	3,55

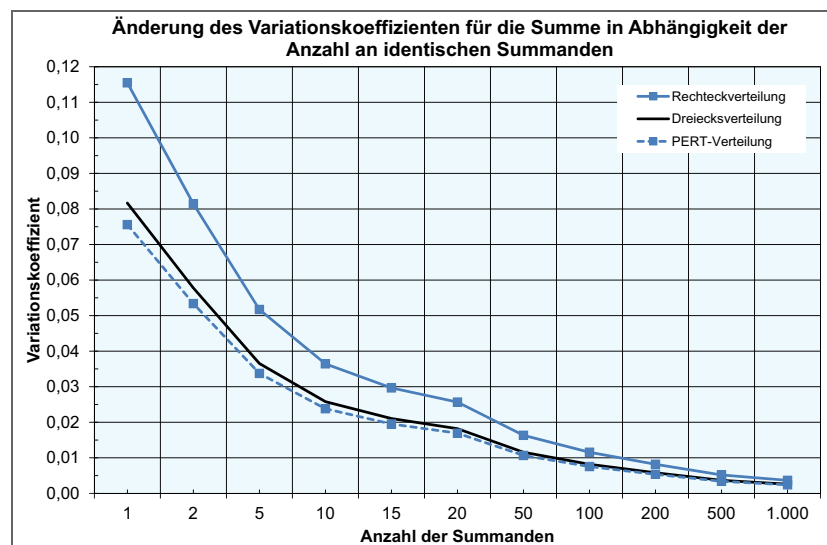
**Tab. 5-3** Standardabweichungen der Summe mehrerer Variablen – Vergleich der Ergebnisse aus der mathematischen Berechnung und der Monte-Carlo-Simulation

<sup>66</sup> Hinweis: Beim händischen Nachrechnen der Ergebnisse können sich geringfügige Abweichungen ergeben, da sämtliche Berechnungen mit MS Excel – und damit mit sämtlichen Nachkommastellen – durchgeführt wurden.

Die Probleme, die sich aus der mathematischen Berechnung ergeben, sind zum einen, dass die Standardabweichung für Verteilungen von ExpertInnen nur sehr schwer abgeschätzt werden kann. Zum anderen entspricht der erwartete Wert (Modus) nicht automatisch dem Mittelwert einer Verteilung. Bei schiefen Verteilungen weichen diese voneinander ab. Schließlich gilt die vorgestellte mathematische Berechnungsgleichung nur für unabhängige – also unkorrelierte – Variablen.

Anmerkung: Für das obige Beispiel macht es im Übrigen keinen Unterschied für den Variationskoeffizienten<sup>67</sup>, welche Größenordnung der minimale, erwartete und der maximale Wert annehmen. Es ändern sich dadurch natürlich die Mittelwerte und die Standardabweichungen, da diese aber bei der Ermittlung des Variationskoeffizienten in Beziehung gesetzt werden, hebt sich dieser Einfluss wieder auf. Ob also 800 – 1.000 – 1.200 oder bspw. 4,8 – 6 – 7,2 für den minimalen, erwarteten und maximalen Wert angesetzt werden, ist für den Variationskoeffizienten unerheblich.

Die Variationskoeffizienten können auch in Form eines Diagramms in Abhängigkeit der Anzahl an Variablen anschaulich dargestellt werden. In Abb. 5-14 wurde der Variationskoeffizient für die Summe mehrerer identischer Variablen ermittelt. Dabei wurden die Verteilungsfunktionen der Summanden für jede der drei Betrachtungen variiert. Die größten Variationskoeffizienten ergeben sich bei Rechteckverteilungen. Die Unterschiede zwischen Dreiecks- und PERT-Verteilungen sind als sehr gering einzustufen. Generell ist eine deutliche Abnahme der Streuung mit zunehmender Anzahl der Summanden erkennbar. Es gilt zu beachten, dass die Abszisse nicht in Form einer Verhältnisskala sondern durch Klassen dargestellt ist.



**Abb. 5-14** Änderung des Variationskoeffizienten für die Summe in Abhängigkeit der Anzahl an identischen Summanden und mit unterschiedlichen symmetrischen Verteilungsfunktionen

<sup>67</sup> Der Variationskoeffizient ist ein relatives Streuungsmaß und wird durch die Division der Standardabweichung durch den Erwartungswert ermittelt.

Weiters ist zu beachten, dass bei jeder der Betrachtungen die Summanden identisch angesetzt wurden und somit den gleichen Einfluss auf die Summe haben.

Die Anwendung des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes kann zur Prüfung der Plausibilität von Ergebnissen einer Monte-Carlo-Simulation herangezogen werden. Sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Eingangsvariablen sowie deren funktionaler Zusammenhang bekannt, kann unter der Voraussetzung, dass die Variablen unabhängig voneinander sind, die Standardabweichung der Zielgröße berechnet werden. Damit erhält man ein Kontrollinstrument, mit dem die Ergebnisse einer Monte-Carlo-Simulation auf Plausibilität geprüft werden können.

### 5.5.8 Korrelation/Korrelationskoeffizienten

Eine Korrelation (lat. Wechselbeziehung) ist ein eindimensionales (standardisiertes) Maß für den linearen Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen. Abhängig von der Ausprägung (Skalierung) der Merkmale<sup>68</sup> kommen unterschiedliche bivariate<sup>69</sup> Korrelationsarten zum Einsatz (siehe Tab. 5-4).

		Merkmal x	
		ordinal	metrisch
Merkmal y	ordinal	Rangkorrelation	Rangkorrelation
	metrisch	Rangkorrelation	Produkt-Moment-Korrelation

Tab. 5-4 Bivariate Korrelationsarten<sup>70</sup>

Weitere Korrelationsarten sind z.B.:

- Punktbiseriale Korrelation (dichotomes und intervallskaliertes Merkmal)
- $\Phi$ -Koeffizient (Phi-Koeffizient – zwei dichotome Merkmale)
- Biseriale Rangkorrelation (dichotomes und rangskaliertes Merkmal)

Weiters wird in zwischenklassische und innerklassische Korrelationen unterschieden:

<sup>68</sup> Unterschiedliche Skalen sind:  
 - Nominalskala (Merkmale ohne natürliche Rangfolge – z.B. Geburtsorte: „Klagenfurt/Graz/Wien“)  
 - Ordinalskala (Merkmale mit natürlicher Rangfolge, über die Größe des Merkmalsunterschieds kann keine Aussage gemacht werden – z.B. „hoch > mittel > niedrig“)  
 - Intervallskala (Merkmale werden durch Zahlenwerte dargestellt, bei denen Rangunterschiede und Abstände zwischen den Werten gemessen werden können. Es gibt keinen natürlichen Nullpunkt – z.B. Temperaturskalen).  
 - Verhältnisskala (Skala besitzt einen absoluten Nullpunkt, negative Werte sind nicht zulässig, Aussagen über Größenverhältnisse sind zulässig – z.B. Skalen physikalischer Größen)  
 - Dichotome Skala (Merkmale, die nur zwei Ausprägungen aufweisen – z.B. „wahr/falsch“)

<sup>69</sup> Bivariate Verteilungen sind zweidimensionale Zufallsvariablen, bei denen sowohl das Merkmal x als auch das Merkmal y durch eine Verteilung dargestellt werden kann.

<sup>70</sup> Vgl. Vorlesungsfolien „Marktforschung“ Sommersemester 2011, Universität Siegen. Online unter: <http://slideplayer.de/slide/644669/#>. Datum des Zugriffs: 03.12.2014

- **Zwischenklassische Korrelationen**  
Befassen sich mit Beziehungen zwischen verschiedenartigen Größen wie beispielsweise:
  - Storch- und Geburtenanzahl
  - Preis und Qualität
  - Arbeitsaufwand und -ergebnis
  - Umsatz und Konjunktur
- **Innerklassische Korrelationen**  
Befassen sich mit Beziehungen zwischen gleichartigen Größen wie beispielsweise:
  - von einem Arbeitsergebnis zum darauffolgenden
  - von einem Tagesumsatz zum nächsten
  - die Entwicklung von Aktienkursen<sup>71</sup>

Innerklassische Korrelationen werden auch Inter-, Intra- oder Autokorrelationen genannt.<sup>72</sup>

In der Kalkulation liegt das Interesse meist auf zwischenklassischen Korrelationen, wie z.B.:

- Zusammenhang zwischen Schalungsfläche und Betonmenge
- Zusammenhang zwischen Betonmenge und Bewehrungsmenge
- Zusammenhang zwischen Bewehrungsgrad und Aufwandswert für das Bewehren

Eine vorhandene Korrelation lässt keine Aussage über die Kausalität zwischen zwei Merkmalsausprägungen zu. Folgende Kausalitätsbeziehungen können vorherrschen:<sup>73</sup>

- x bewirkt y
- y bewirkt x
- x und y werden durch eine oder mehrere andere Variablen beeinflusst (Scheinkorrelation bzw. partielle Korrelation)

### 5.5.8.1 Produkt-Moment-Korrelation

Die Produkt-Moment-Korrelation (auch als Pearson- oder Bravais-Pearson-Korrelation bezeichnet) gibt den standardisierten Zusammenhang zwischen zwei intervallskalierten Merkmalen an. Es handelt sich dabei um die Kovarianz zweier Merkmale, dividiert durch das Produkt der Standardabweichungen (siehe Glg. (5-4)). Die Kovarianz wird dadurch standardisiert und Korrelationskoeffizienten werden vergleichbar.

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5-4)$$

<sup>71</sup> Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 48

<sup>72</sup> Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 48

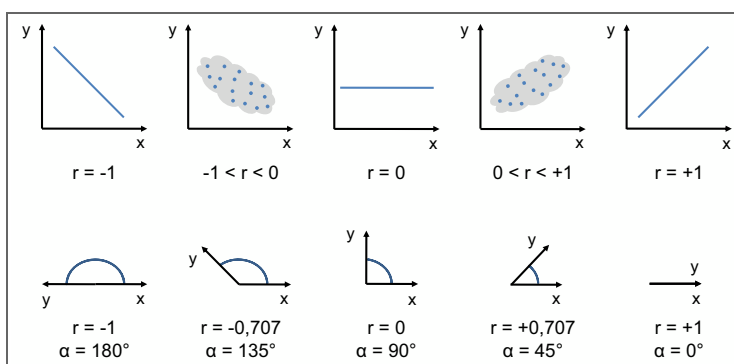
<sup>73</sup> Vgl. Vorlesungsfolien „Marktforschung“ Sommersemester 2011, Universität Siegen. Online unter: <http://slideplayer.de/slide/644669/#>. Datum des Zugriffs: 03.12.2014

Der Korrelationskoeffizient kann nur Werte zwischen -1 und +1 annehmen und gibt die Stärke des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen wieder.

Liegt der Korrelationskoeffizient bei -1, liegt ein perfekter negativer Zusammenhang vor. Alle Messpunkte liegen auf einer Geraden mit negativer Steigung.

Liegt der Korrelationskoeffizient bei +1, liegt ein perfekter positiver Zusammenhang vor. Alle Messpunkte liegen auf einer Geraden mit positiver Steigung.

Ist der Korrelationskoeffizient null, besteht kein linearer Zusammenhang, d.h. die Variablen sind unkorreliert. Dies bedeutet aber nicht, dass keine nichtlinearen Zusammenhänge vorherrschen können.



**Abb. 5-15** Zusammenhang zwischen zwei Variablen x und y bei unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten – oben: Punktwolken – unten: Vektordarstellung<sup>74</sup>

Einen grafischen Überblick über die Interpretation von Korrelationskoeffizienten liefert Abb. 5-15. Darin sind die Zusammenhänge in der oberen Reihe in Form von Punktwolken und in der unteren Reihe als Vektorpaare zweier Variablen (x und y) dargestellt. Für die Darstellung als Vektorpaar lässt sich der Korrelationskoeffizient r in den Kosinus von  $\alpha$  überführen (siehe Glg. (5-5)).

$$r = \cos \alpha \quad (5-5)$$

Die Produkt-Moment-Korrelation ist identisch mit der Rangkorrelation – vorausgesetzt es liegen intervallskalierte Merkmale vor.<sup>75</sup>

In @Risk können Produkt-Moment-Korrelationen in Form von Korrelationsmatrizen eingegeben werden.

### 5.5.8.2 Rangkorrelation

Die Rangkorrelation (auch Korrelationskoeffizient nach Spearman genannt) wird bei Vorliegen von zwei Merkmalen einer Ordinalskala oder einem

<sup>74</sup> Vgl. <http://www.faes.de/Basis/Basis-Statistik/Basis-Statistik-Korrelation-Re/basis-statistik-korrelation-re.html>. Datum des Zugriffs: 10.12.2011 und <http://www.faes.de/Basis/Basis-Lexikon/Basis-Lexikon-Multivariate/Basis-Lexikon-Faktorenanalyse/basis-lexikon-faktorenanalyse.html>. Datum des Zugriffs: 10.12.2011  
Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 78ff

<sup>75</sup> Vgl. z.B. Krempf (2012). Korrelationen bei Aufwandswerten für Schal- und Bewehrungsarbeiten. S. 56

Merkmal einer Intervallskala und einem Merkmal einer Ordinalskala (siehe Tab. 5-4) angewendet. Den Merkmalsausprägungen werden Rangplätze zugewiesen und deren Differenz  $d_i$  ermittelt. Die Anzahl der möglichen Rangplätze  $n$  entspricht der Anzahl an vorhandenen Messdatenpaaren. Berechnet wird die Rangkorrelation mittels Glg. (5-6).

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (5-6)$$

### 5.5.8.3 Erhebung von Korrelationen

Die Erhebung von Korrelationen erfolgt üblicherweise indirekt durch die Analyse vorhandener Datenreihen, die aus Messungen, Befragungen, Experimenten etc. stammen und hinsichtlich ihres linearen Zusammenhangs untersucht werden (siehe Abb. 5-16 – rechts).

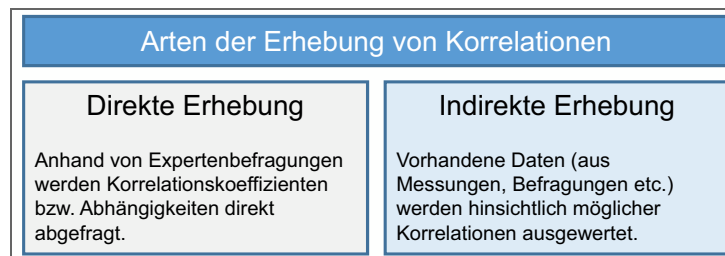


Abb. 5-16 Erhebungsmethoden für Korrelationen

Im Zuge dieser Arbeit wurden Korrelationskoeffizienten direkt durch eine ExpertInnenbefragung erhoben. Die ExpertInnen konnten für die Abhängigkeiten spezieller Parameter – im Zusammenhang mit der Ermittlung des Gesamt-Aufwandswerts für die Stahlbetonarbeiten – Einschätzungen abgeben. Die Auswertung erfolgte in Form von Box-Plots und deskriptiven Statistiken. Weiters wurden Mittelwerte und M-Schätzer gebildet, die eine fundierte Empfehlung für den Ansatz von Korrelationen bei der Ermittlung des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten liefern.

### 5.5.9 Simulation

Unter Simulation wird in dieser Arbeit das rechnerische Nachahmen realer und/oder geplanter Situationen mit Hilfe eines Rechenmodells auf einem Computer bezeichnet. Simulationen empfehlen sich dann, wenn ein Ausprobieren in der Realität zu teuer ist, zu einer Zerstörung des Untersuchungsgegenstandes oder zu einer Gefährdung von Menschenleben führen könnte (z.B. Flugsimulator). Sie werden auch dann eingesetzt, wenn Problemstellungen in der Realität durch ein mathematisches Modell beschrieben werden können, eine analytische Lösung aber nicht möglich ist oder der Rechenaufwand viel zu groß wäre.<sup>76</sup>

Simulationen werden auch eingesetzt, um durch systematische Parametervariation Erkenntnisse zu gewinnen, die sich auf die Realität übertragen lassen.<sup>77</sup>

<sup>76</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 13f

<sup>77</sup> Vgl. Wenzel et al. (2008). Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. S. 1



In Abb. 5-17 wird die Einordnung von Experimentiermöglichkeiten und die Klassifizierung von Simulationsmodellen dargestellt. Bei den Verzweigungen der Unterpunkte wird jeweils nur auf jene eingegangen, die für diese Arbeit von Interesse sind (gekennzeichnet durch durchgezogene Pfeile).

Bei der Einordnung von Experimentiermöglichkeiten kann ausgehend vom betrachteten System<sup>78</sup> in Experimente am realen System und Experimente an einem Systemmodell unterschieden werden. Dabei kommen entweder physische oder mathematische Modelle zum Einsatz. In dieser Arbeit werden mathematische Modelle herangezogen, wobei eine analytische Lösung – durch die geforderte Berücksichtigung von Unsicherheiten – nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand möglich wäre. Im konkreten Fall kommen Monte-Carlo-Simulationen zum Einsatz.

Für die Klassifikation von Simulationsmodellen ist zunächst in statische und dynamische Modelle zu unterscheiden, wobei bei statischen Modellen der Faktor Zeit keinerlei Berücksichtigung findet. Dynamische Modelle bilden Prozesse bzw. Abläufe ab und werden weiters in kontinuierliche und diskrete Modelle differenziert. Diskrete Simulationen werden in Produktions- und Logistikbereichen zur Planung, Bewertung, Verbesserung und Steuerung von Systemen und Prozessen eingesetzt.<sup>79</sup>

Kontinuierliche Modelle sind durch physikalische oder biologische Gesetze beschrieben und werden in Form von Differentialgleichungen dargestellt.<sup>80</sup>

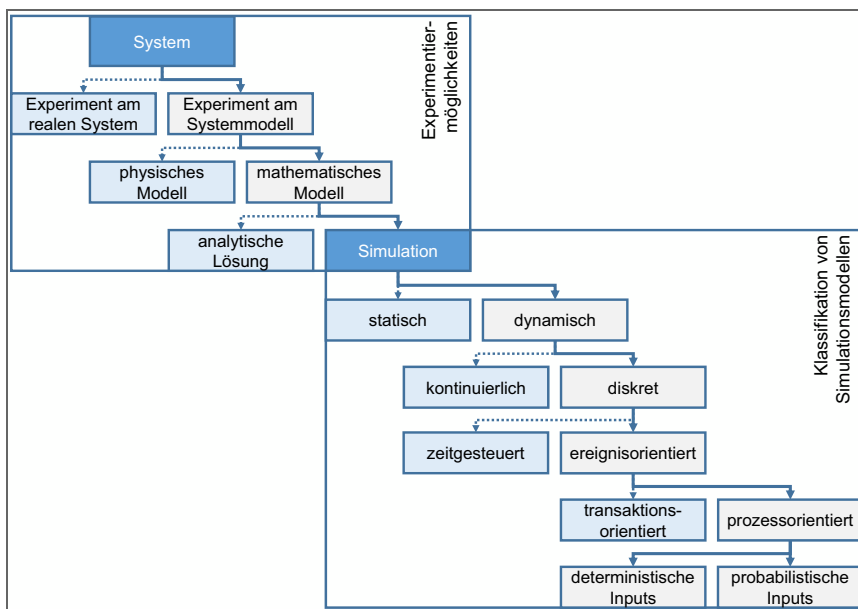


Abb. 5-17 Einordnung von Experimentiermöglichkeiten inkl. Klassifikation von Simulationsmodellen<sup>81</sup>

<sup>78</sup> Unter „System“ wird allgemein eine Gesamtheit von Elementen verstanden, die miteinander in Beziehung stehen und interagieren.

<sup>79</sup> Vgl. Wenzel et al. (2008). Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. S. 1

<sup>80</sup> Vgl. Raffel (2001). Simulationstheorie. S. 4 (Online unter: <http://www.wuraffel.de/wissenschaft/publikationen/Simulationstheorie.pdf>. Datum des Zugriffs: 01.05.2015)

<sup>81</sup> Vgl. Böhnlein (2010). Simulationsgestützte Spezifikation und Analyse von Geschäftsmodellen und Geschäftsprozessen. S. 95ff (Online unter: [http://www.asim-fachtagung-spl.de/asim2010/papers/E9\\_Boehnlein.pdf](http://www.asim-fachtagung-spl.de/asim2010/papers/E9_Boehnlein.pdf). Datum des Zugriffs: 29.04.2015)

Vgl. Böhnlein (2004). Simulation in der Betriebswirtschaft. S. 1ff

Vgl. Raffel (2001). Simulationstheorie. S. 4 (Online unter: <http://www.wuraffel.de/wissenschaft/publikationen/Simulationstheorie.pdf>. Datum des Zugriffs: 01.05.2015)

Diskrete Simulationsmodelle können weiters in ereignisorientierte und zeitgesteuerte Modelle unterschieden werden. Bei zeitgesteuerte Simulationen wird die Simulationszeit fortlaufend erhöht und Modellkomponenten auf Basis der Zustandsänderungen der letzten Epoche aktualisiert. Typische Anwendungsbeispiele sind ökologische Prognosemodelle, volkswirtschaftliche Planspiele sowie Modelle aus dem Bereich der Meteorologie. Bei ereignisorientierten Simulationen werden Zustandsänderungen aufgrund von Ereignissen verursacht. Es wird in transaktionsorientierte und prozessorientierte Modelle unterschieden.<sup>82</sup>

Transaktionsorientierte Simulationen eignen sich besonders für Warteschlangensysteme, bei denen in einem System vernetzter Stationen Arbeitseinheiten (Transaktionen) von einer Station zur nächsten weitergereicht werden.<sup>83</sup>

In prozessorientierten Modellen werden die auf ein Objekt bezogenen Aktivitäten zu einem Prozess zusammengefasst. Prozesse können sich deaktivieren und andere Prozesse aktivieren (z.B. Eintritt von Produktivitätsverlusten).<sup>84</sup>

Schließlich wird noch die Art der Eingabeparameter (Inputs) unterschieden. Ist das mathematische Modell erstellt, können die Eingaben sowohl mittels deterministischer als auch probabilistischer Inputs erfolgen. Probabilistische Betrachtungen haben dabei den Vorteil, dass Unsicherheiten direkt durch die Wahl von Verteilungsfunktionen in die Berechnungen integriert werden können.

Eine Monte-Carlo-Simulation bezeichnet einen Rechendurchgang eines Berechnungsmodells mit probabilistischen Inputwerten. Anhand von Simulationen können Experimente, Sensitivitätsanalysen, Variantenuntersuchungen und Optimierungen (Operations Research) an einem mathematischen Modell kostengünstig vorgenommen werden. Entscheidend ist, dass die Ergebnisse aus dem Simulationsmodell auch auf reale Systeme übertragbar sind.<sup>85</sup>

Bei Monte-Carlo-Simulationen wird eine individuell festgelegte Anzahl an Iterationen durchgeführt.

### 5.5.10 Iteration

Bei Iterationen ist zwischen stufenweisen und wiederholenden Iterationen zu unterscheiden. Ein schematischer Vergleich der beiden Iterationsarten ist in Abb. 5-18 dargestellt.

<sup>82</sup> Vgl. Mattern (1996). Modellbildung und Simulation. S. 4ff (Online unter: [http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/Mod\\_Sim.pdf](http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/Mod_Sim.pdf). Datum des Zugriffs: 22.05.2015)

<sup>83</sup> Vgl. Mattern (1996). Modellbildung und Simulation. S. 4f (Online unter: [http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/Mod\\_Sim.pdf](http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/Mod_Sim.pdf). Datum des Zugriffs: 22.05.2015)

<sup>84</sup> Vgl. Raffel (2001). Simulationstheorie. S. 4 (Online unter: <http://www.wuraffel.de/wissenschaft/publikationen/Simulationstheorie.pdf>. Datum des Zugriffs: 01.05.2015)

<sup>85</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 269

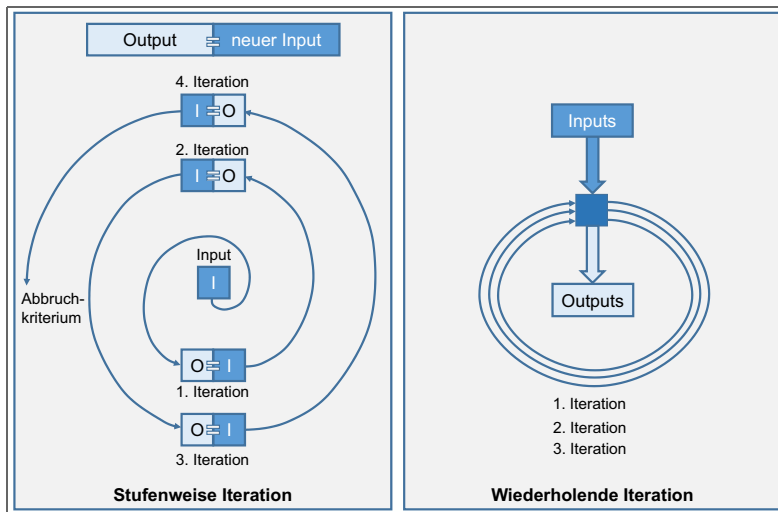


Abb. 5-18 Schematische Darstellung stufenweiser (links) und wiederholender Iterationen (rechts)

Stufenweise Iterationen werden z.B. bei der Aggregation von Produktivitätsverlusten oder im Zuge von Optimierungsverfahren eingesetzt. Dabei bauen die Ergebnisse eines Durchlaufs (Iteration) auf vorhergehende Ergebnisse auf. Der Output („O“) eines Iterationsschritts wird zum neuen Input („I“) des nächsten Berechnungsdurchgangs (siehe Abb. 5-18 – links). Es kommt also zu einer schrittweisen Annäherung des zu ermittelnden Outputs. Die Berechnungen werden solange fortgeführt, bis ein Abbruchkriterium (z.B. Zeitlimit, vorgegebene Anzahl an Iteration erreicht, keine signifikante Änderung des Outputs bei steigender Anzahl an Iterationen) erfüllt wird.

Wiederholende Iterationen werden z.B. bei einem Simulationsdurchlauf mit der Monte-Carlo-Methode durchgeführt. Hier ändern sich die Zufallszahlen der Inputs unabhängig vom Ergebnis einer vorhergehenden Iteration. Die Einzelergebnisse von wiederholenden Iterationen können gesammelt als Histogramm dargestellt werden.

### 5.5.11 Sicherheitsniveau

Als Sicherheitsniveau wird jener Quantilwert einer Verteilung bezeichnet, der aufgrund risikopolitischer und strategischer Überlegungen als Grenzwert für Entscheidungen individuell festgelegt wird. Ein Sicherheitsniveau von 80 % für Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten bedeutet, dass in 20 % der Fälle dieser Quantilwert über- und in 80 % der Fälle unterschritten wird. Die Chance, niedrigere Kosten in der Ausführung zu realisieren liegt damit bei 80 %, das Risiko bei 20 %.

## 5.6 Funktion der Monte-Carlo-Simulation

Anhand eines einfachen Beispiels wird gezeigt, wie die Monte-Carlo-Simulation bei einer konkreten Berechnung funktioniert. Es wird die Berechnung der Einzelkosten für Stahlbetonarbeiten im Zuge einer Grob-

trachtung anhand Glg. (5-7) einmal mit deterministischen und einmal mit probabilistischen Werten durchgeführt.

$$K_{STB} = (ML_{STB} \cdot AW_{STB} + k_{Gerät} + k_{Material}) \cdot BT_M \quad (5-7)$$

Die Einzelkosten für die Stahlbetonarbeiten  $K_{STB}$  [€] ergeben sich aus der Multiplikation des Mittellohns  $ML_{STB}$  [€/Std] mit dem Gesamt-Aufwandswert für die Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB}$  [Std/m<sup>3</sup>] plus den Gerätekosten  $k_{Gerät}$  [€/m<sup>3</sup>] und Materialkosten  $k_{Material}$  [€/m<sup>3</sup>]. Die Summe wird schließlich mit der Betonmenge  $BT_M$  [m<sup>3</sup>] multipliziert.

Werden für die einzelnen Berechnungsparameter lediglich deterministische Werte (also nur einzelne Zahlenwerte) eingesetzt (siehe Spalte D der Tab. 5-5), folgt als Ergebnis dieser Berechnung wiederum ein Zahlenwert (Zelle D6). Dieser einzelne Wert ist zwar mathematisch richtig berechnet, berücksichtigt jedoch nicht die Unsicherheiten mit denen die Berechnungsparameter behaftet sind. Soll das Ergebnis als Prognose für zukünftige Kosten dienen, steht bereits fest, dass dieser Wert nicht genau erreicht werden wird. Eine Aussage über Unsicherheiten, Bandbreiten und Wahrscheinlichkeiten kann aus einer deterministischen Berechnung nicht getroffen werden.

Lfd. Nr.	Berechnungsparameter	Einheit	ERW
0	A	B	C
1	Mittellohn	$ML_{STB}$	€/Std
2	Gesamt-Aufwandswert	$AW_{STB}$	Std/m <sup>3</sup>
3	Gerätekosten	$k_{Gerät}$	€/m <sup>3</sup>
4	Materialkosten	$k_{Material}$	€/m <sup>3</sup>
5	Betonmenge	$BT_M$	m <sup>3</sup>
6	<b>Einzelkosten - Stahlbetonarbeiten</b>	<b><math>K_{STB}</math></b>	<b>€</b>
			<b>34,00</b>
			<b>5,90</b>
			<b>65,00</b>
			<b>180,00</b>
			<b>38.000,00</b>
			<b>16.932.800,00</b>

Tab. 5-5 Deterministische Berechnung der Einzelkosten für Stahlbetonarbeiten

Wird die gleiche deterministische Berechnungsvorschrift (Glg. (5-7)) herangezogen, aber anstelle der deterministischen Inputwerte Verteilungen für die Berechnungsparameter angesetzt, ergibt sich nach einer Monte-Carlo-Simulation mit mehreren tausend Einzelergebnissen ein Histogramm, anhand dessen Aussagen über Wahrscheinlichkeiten getroffen werden können.

In Tab. 5-6 wurde für jeden Eingangssparameter (Zeilen 1 bis 5) eine Dreiecksverteilung – definiert durch einen minimalen, erwarteten und maximalen Wert (Spalten D bis F) – angesetzt. Die Verteilungen selbst sind in der Spalte G hinterlegt. Die Zahlenwerte in den Zellen G1 bis G5 stellen die Mittelwerte der definierten Verteilungen dar. Werden diese Werte in Glg. (5-7) eingesetzt, ergibt sich für die Einzelkosten jener Wert, der in Zelle G6 eingetragen ist.

Durch die Anwendung der Monte-Carlo-Simulation wird jedoch nicht nur ein Wert, sondern im vorliegenden Fall 50.000 Einzelergebnisse (= 50.000 wiederholende Iterationen) berechnet. Als Ergebnis dieser Iterationen ist in Zelle G6 ein Histogramm hinterlegt<sup>86</sup>, welches das Spektrum möglicher

<sup>86</sup> Spezifikum des verwendeten Softwareprogramms @Risk.

Szenarien abbildet. Aus darstellungstechnischen Gründen wird das Histogramm nicht direkt in Tab. 5-6, sondern in einer separaten Abbildung dargestellt (siehe Abb. 5-19).

Lfd. Nr.	Berechnungsparameter		Einheit	MIN	ERW	MAX	Verteilung
0	A	B	C	D	E	F	G
1	Mittellohn	ML <sub>STB</sub>	€/Std	32,00	34,00	36,00	34,00
2	Gesamt-Aufwandswert	AW <sub>STB</sub>	Std/m <sup>3</sup>	5,30	5,90	6,80	6,00
3	Gerätekosten	k <sub>Gerät</sub>	€/m <sup>3</sup>	61,00	65,00	69,00	65,00
4	Matrialkosten	k <sub>Material</sub>	€/m <sup>3</sup>	165,00	180,00	192,00	179,00
5	Betonmenge	BT <sub>M</sub>	m <sup>3</sup>	36.600,00	38.000,00	39.200,00	37.933,33
6	Einzelkosten - Stahlbetonarbeiten		K <sub>STB</sub>				16.994.133,33

Tab. 5-6 Probabilistische Berechnung der Einzelkosten für Stahlbetonarbeiten

Die Funktionsweise der Simulation ist in Abb. 5-19 dargestellt. Bei jeder der durchgeführten Iterationen werden zufällige Werte aus dem Bereich der angesetzten Dreiecksverteilungen gewählt (symbolisiert durch weiße Pfeile) und ein Ergebnis für die Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten nach der vorgegebenen Berechnungsgleichung (Glg. (5-7)) ermittelt. Werden diese Einzelergebnisse zusammengefasst als Histogramm dargestellt, kann z.B. eine Bandbreite angegeben werden, innerhalb der sich die zentralen 90 % aller ermittelten Werte befinden (Quantilsabstand zwischen Q<sub>5</sub> und Q<sub>95</sub>).

Der weiße Pfeil, der im Histogramm der Einzelkosten eingezeichnet ist, stellt den deterministisch ermittelten Wert (16.932.800,00 €) dar. Erst mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation wird verdeutlicht, welche Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit für diesen einzelnen deterministischen Wert vorliegt bzw. wo sich dieser innerhalb der ermittelten Bandbreite befindet.

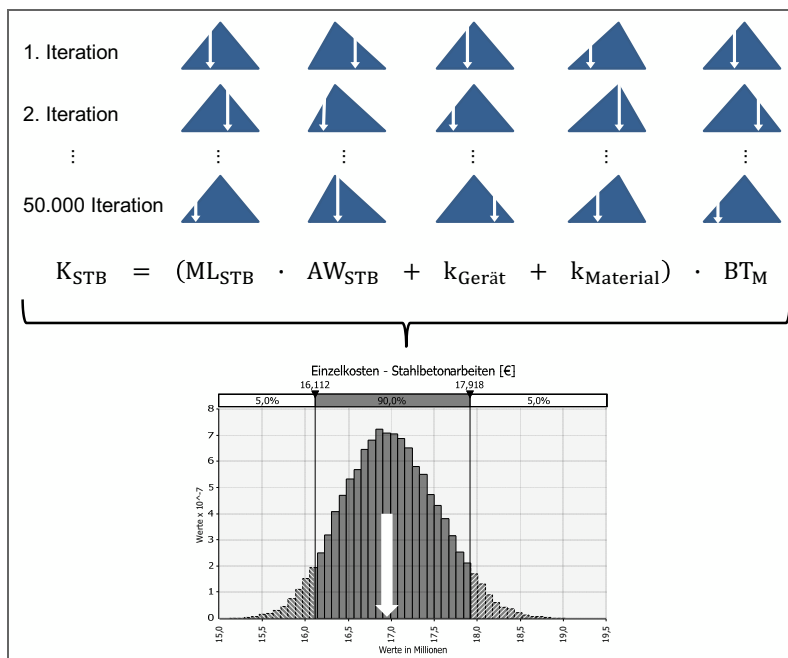


Abb. 5-19 Funktionsweise der Monte-Carlo-Methode für eine Iteration

Für das gezeigte Beispiel wurde angenommen, dass die Inputparameter unabhängig voneinander sind. Um die Zusammenhänge zwischen den Parametern noch besser abbilden und berücksichtigen zu können, ist der Einsatz von Korrelationen denkbar (siehe Abschnitt 5.11).

Die Ergebnisse einer Monte-Carlo-Simulation sind für Ingenieure zunächst ungewohnt. Sie stellen kein scharfes Bild dar, sondern beschreiben die Unschärfen einer Berechnung. Diese können durch die Darstellung als Histogramm in weiterführenden Überlegungen und Entscheidungen berücksichtigt werden. Das eingegangene Risiko bzw. die erwartete Chance von Entscheidungen lassen sich auf Basis eines gewählten Sicherheitsniveaus quantifizieren. Entscheidungen können damit objektiviert werden.<sup>87</sup>

### 5.6.1 Generierung von Zufallszahlen

Für die Durchführung von Simulationsexperimenten ist die Generierung von Ausprägungen der Zufallsvariablen entsprechend der gewählten Inputverteilungen erforderlich. Diese Zufallszahlen werden mit Hilfe eines Zufallsgenerators<sup>88</sup> (Algorithmus) vom Computer erzeugt. Es handelt sich damit also nicht um „echte“ Zufallszahlen, sondern um sogenannte „Pseudozufallszahlen“, da sie mit Hilfe von deterministischen Verfahren erzeugt werden. Die wichtigsten Eigenschaften von Zufallszahlen sind die Unabhängigkeit und deren Gleichverteilung. Diese und weitere Bedingungen müssen bei Pseudozufallszahlen durch den Zufallsgenerator und den dafür zugrunde liegenden Algorithmus erfüllt werden. Weitere Eigenschaften, die Pseudozufallszahlen erfüllen sollten, lauten.<sup>89</sup>

- Effizienz: Die Erzeugung der Zufallszahlen sollte schnell und speicherschonend erfolgen.
- Reproduzierbarkeit: Durch Setzen eines „seed“ (ein Startwert für die Generierung der Zufallszahlen) können die Zufallszahlen bei einer neuerlichen Simulation wiederhergestellt werden.
- Lange Zyklen: Echte Zufallszahlenreihen liegen dann vor, wenn man eine solche Folge nicht durch ein Gesetz beschreiben kann. Zufallszahlen, die durch Algorithmen erzeugt werden (Pseudozufallszahlen), sind daher nicht zufällig und weisen Perioden auf. Diese Zyklen sollten möglichst lange sein, damit nicht immer die gleichen (Pseudo-)Zufallszahlen verwendet/erzeugt werden.

Mit Hilfe der Zufallsgeneratoren können zwar (Pseudo-)Zufallszahlen generiert werden, die Auswahl von Zufallswerten innerhalb definierter Verteilungen, mit denen in weiterer Folge ein Berechnungsdurchgang einer Simulation durchgeführt werden kann, erfordert den Einsatz spezieller Probenhebungsverfahren.

<sup>87</sup> Vgl. Lederer (1982). Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung. S. 45

<sup>88</sup> In @Risk stehen in der Version 6 insgesamt acht Zufallsgeneratoren zur Verfügung: RAN3I; MersenneTwister; MRG32k3a; MWC; KISS; LFIB4; SWB; KISS\_SWB. Standardmäßig wird „MersenneTwister“ für die Simulationen verwendet. Dieser Algorithmus hat eine Periode (Wiederkehrzyklus von  $\sim 4,3 \cdot 10^{6001}$ ) und hat eine sehr geringe Korrelation zwischen aufeinanderfolgenden Wertefolgen der Ausgabesequenz. Der MersenneTwister ist als Freeware online erhältlich: <http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/~m-mat/MT/emt.html>. Datum des Zugriffs: 27.11.2014.

<sup>89</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 280f

## 5.6.2 Probenerhebungsverfahren

Die Wahl der Zufallswerte für einen (wiederholenden) Iterationsschritt aus den vorgegebenen Verteilungen der Inputgrößen kann im verwendeten Softwareprogramm (@Risk) über zwei unterschiedliche Probenerhebungsverfahren geschehen:

- Monte-Carlo-Probenerhebungsverfahren
- Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren

Ausgehend von der kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilung der Inputparameter werden die Zufallszahlen aus der vorgegebenen Bandbreite gewählt.

### 5.6.2.1 Monte-Carlo

Die Funktionsweise des Monte-Carlo-Probenerhebungsverfahrens wird anhand einer Prinzipskizze (siehe Abb. 5-20) gezeigt. Für jede Iteration wird zunächst (mit Hilfe eines Zufallsgenerators – Pseudozufallszahl – siehe Abschnitt 5.6.1) ein zufälliger Wert zwischen 0 und 1 generiert. Mit diesen Zufallswerten wird auf der Ordinate der kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilung begonnen und durch eine Horizontale ein Schnittpunkt mit der Summenkurve gebildet. Wird von diesem Schnittpunkt eine Vertikale auf die Abszisse verlängert, ergibt sich ein Zufallswert, mit dem in einer Iteration als Input gerechnet wird. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis die in der Simulation angegebene Anzahl an Iterationen erreicht ist. Der Nachteil dieses Verfahrens zeigt sich bei wenigen Iterationen, da es dann zu einer Bündelung der abgetasteten Werte auf der Abszisse kommen kann (siehe Abb. 5-20). D.h. die Extremwerte in den Randbereichen werden kaum oder gar nicht in die Simulation einbezogen.

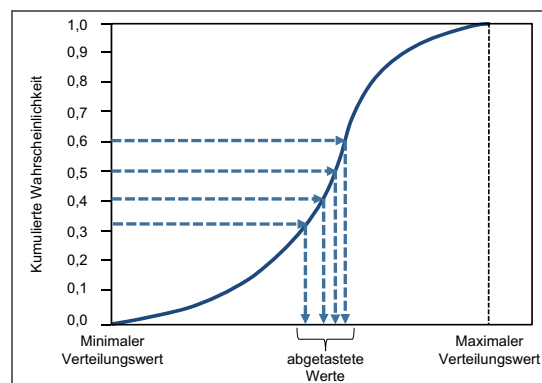


Abb. 5-20 Prinzipskizze – Monte-Carlo-Probenerhebungsverfahren – Beispiel für eine ungünstige Probenerhebung<sup>90</sup>

### 5.6.2.2 Latin Hypercube

Die Funktionsweise des Latin Hypercube Probenerhebungsverfahrens wird ebenfalls anhand einer Prinzipskizze (siehe Abb. 5-21) gezeigt. Bei der Latin

<sup>90</sup> Vgl. Palisade Corporation (2013). Benutzerhandbuch – @Risk. S. 940  
Die Probenerhebung ist deswegen ungünstig, da der abgetastete Bereich der Werte sehr klein gegenüber der vorhandene Bandbreite der definierten Verteilung (zwischen minimalem und maximalem Verteilungswert) ist.

Hypercube Probenerhebung wird die Ordinate in Bereiche gleicher Wahrscheinlichkeit eingeteilt. Die Anzahl der Bereiche entspricht dabei der Anzahl an gewählten Iterationen. In jedem dieser Bereiche wird eine Zufallszahl generiert und durch den Schnitt mit der Summenkurve ein Wert auf der Abszisse ermittelt. Der Vorteil bei diesem Verfahren ist der Umstand, dass bereits bei wenigen Iterationen ein breiterer Bereich an abgetasteten Werten erhoben werden kann (siehe Abb. 5-21). Es sind damit insgesamt weniger Iterationsschritte als beim Monte-Carlo-Probenerhebungsverfahren notwendig, um ein stabiles Ergebnis der Simulation zu erzielen.

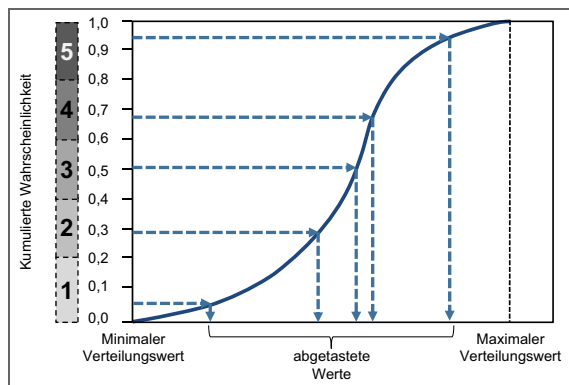


Abb. 5-21 Prinzipskizze – Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren<sup>91</sup>

Für die Simulationen in dieser Arbeit wird ausschließlich das Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren angewendet. Trotzdem wird die Methode als Monte-Carlo-Simulation bezeichnet, da es sich beim Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren lediglich um ein verbessertes (weniger rechenintensives) Verfahren für die Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen handelt.

### 5.6.3 Anzahl der Iterationen

Die Wahl der Anzahl an durchzuführenden (wiederholenden) Iterationen hängt wesentlich von der Fragestellung, dem zugrunde gelegten Modell und auch von den angesetzten Verteilungen ab. Wird beispielsweise die Wahrscheinlichkeit von einzelnen Ausreißern untersucht (Extremwerte), ist eine größere Anzahl an Iterationen erforderlich, um in diesen Extrembereichen überhaupt eine ausreichende Ergebnismenge zu erhalten. Werden nur geschlossene Verteilungen (z.B. Rechteckverteilung, Dreiecksverteilung, PERT-Verteilungen) eingesetzt, kann in der Regel mit weniger Iterationen gerechnet werden als bei einseitig (z.B. LogLogistic-Verteilung) oder beidseitig offenen Verteilungen (z.B. Normalverteilung).

In Abb. 5-22 ist das Histogramm für die Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten, berechnet mit Dreiecksverteilungen als Inputs (siehe Beispiel in Abschnitt 5.6), bei unterschiedlichen Iterationsanzahlen dargestellt. Es zeigt sich, dass bei wenigen Iterationen Ergebnisse in den Extrembereichen fehlen und das Histogramm „Lücken“ aufweist. Je mehr Einzelergebnisse generiert werden, desto glatter wird das Histogramm und desto stabiler werden die Quantil-

<sup>91</sup> Vgl. Palisade Corporation (2013). Benutzerhandbuch – @Risk. S. 941



werte gegenüber weiteren Iterationen.<sup>92</sup> Für die nachfolgenden Monte-Carlo-Simulationen wurden jeweils 50.000 (wiederholende) Iterationen mit dem Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren durchgeführt.<sup>93</sup>

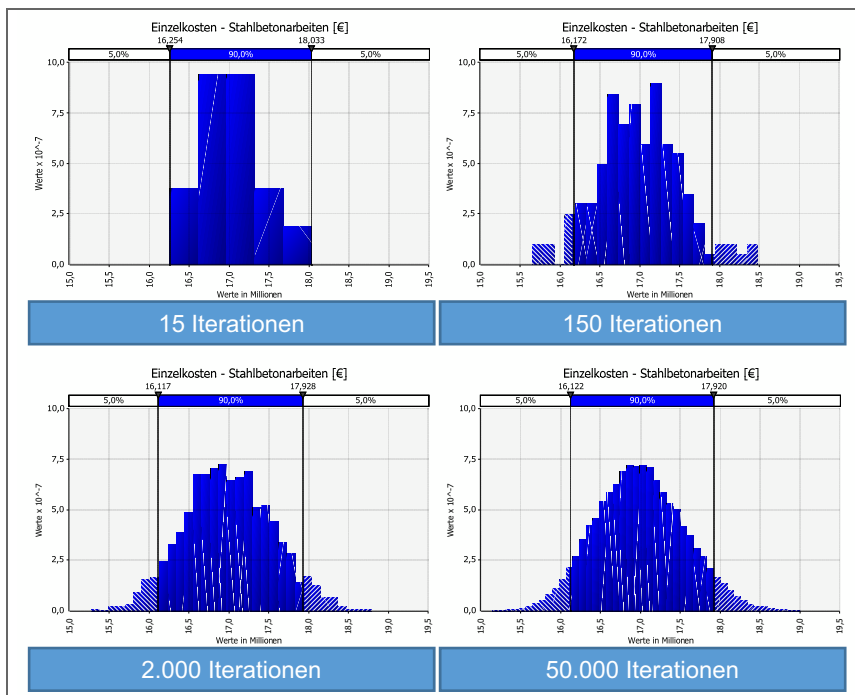


Abb. 5-22 Einfluss der Anzahl an Iterationen auf die Darstellung der Ergebnisse einer Monte-Carlo-Simulation (Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren)

## 5.7 Einfluss der Form von Verteilungsfunktionen

Nachfolgend wird gezeigt, welchen Einfluss unterschiedliche Verteilungsfunktionen der Inputs auf Outputergebnisse haben.<sup>94</sup> Anhand der Berechnung des Gesamt-Aufwandswerts für Stahlbetonarbeiten werden folgende Verteilungsfunktionen für die Inputparameter verglichen:

- Dreiecksverteilung
- PERT-Verteilung
- Rechteckverteilung
- Normalverteilung
- LogTriangular-Verteilung nach Chau<sup>95</sup>
- LogLogistic-ähnliche Verteilung nach Hofstadler<sup>96</sup>

<sup>92</sup> In Abb. 5-22 wurden die Gleitbegrenzer am oberen Rand der Histogramm immer so eingestellt, dass das 5 %- und das 95 %-Quantil bezogen auf die entsprechenden Histogramme angezeigt wird.

<sup>93</sup> Ein ähnlicher Vergleich findet sich auch in: Naumann (2007). Kosten-Risiko-Analyse für Verkehrsinfrastrukturprojekte. S. 170ff

<sup>94</sup> Siehe auch eine ähnliche Untersuchung von Hofstadler (2011). Application of the Monte-Carlo Method to Determine the Costs for Construction Projects – Influence of Ranges and Correlations on Probability Distribution.

<sup>95</sup> Vgl. Chau (1995b). Monte Carlo simulation of construction costs using subjective data. S. 378

<sup>96</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Monte-Carlo-Simulation im Baubetrieb – Verteilungsfunktion für Aufwandswerte bei Schararbeiten. S. 194ff

Der Gesamt-Aufandswert für Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB}$  [Std/m<sup>3</sup>] ergibt sich aus den Aufandswerten für das Schalen  $AW_S$  [Std/m<sup>2</sup>], Bewehren  $AW_{BW}$  [Std/t] und Betonieren  $AW_{BT}$  [Std/m<sup>3</sup>] sowie dem Schalungsgrad  $s_{g,bwk}$  [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] und dem Bewehrungsgrad  $bw_{g,bwk}$  [t/m<sup>3</sup>] nach Glg. (5-8).

$$AW_{STB} = AW_S \cdot s_{g,bwk} + AW_{BW} \cdot bw_{g,bwk} + AW_{BT} \quad (5-8)$$

Ausgangsbasis für das gezeigte Beispiel bildet eine deterministische Berechnung des Gesamt-Aufandswerts mit den Zahlenwerten in Tab. 5-7. Der deterministische Gesamt-Aufandswert ergibt sich mit 6,10 Std/m<sup>3</sup>.

Ldf. Nr.	Berechnungsparameter		Einheit	ERW
0	A	B	C	D
1	Schalungsgrad	$s_{g,bwk}$	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	3,00
2	Bewehrungsgrad	$bw_{g,bwk}$	kg/m <sup>3</sup>	115,00
3	Aufandswert für die Schalarbeiten	$AW_S$	Std/m <sup>2</sup>	1,20
4	Aufandswert für die Bewehrungsarbeiten	$AW_{BW}$	Std/t	13,00
5	Aufandswert für die Betonarbeiten	$AW_{BT}$	Std/m <sup>3</sup>	1,00
6	<b>Gesamt-Aufandswert</b>	<b><math>AW_{STB}</math></b>	<b>Std/m<sup>3</sup></b>	<b>6,10</b>

Tab. 5-7 Beispielhafte deterministische Berechnung des Gesamt-Aufandswerts für Stahlbetonarbeiten

Diese deterministischen Eingabewerte werden in weiterer Folge durch unterschiedliche Verteilungsfunktionen ersetzt. Es werden dazu immer die gleichen Verteilungsfunktionen für alle Einflussgrößen angesetzt, um den Einfluss unterschiedlicher Verteilungsfunktionen der Inputs auf die Outputergebnisse zu zeigen.

Für die Dreiecksverteilungen werden die deterministischen Werte aus Tab. 5-7 als erwartete Werte angenommen und jeweils zusätzliche minimale und maximale Werte angesetzt.

In Tab. 5-8 sind die minimalen, erwarteten und maximalen Werte in den Spalten D, E und F eingetragen.

Ldf. Nr.	Berechnungsparameter		Einheit	MIN	ERW	MAX
0	A	B	C	D	E	F
1	Schalungsgrad	$s_{g,bwk}$	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	2,70	3,00	3,30
2	Bewehrungsgrad	$bw_{g,bwk}$	kg/m <sup>3</sup>	100,00	115,00	140,00
3	Aufandswert für die Schalarbeiten	$AW_S$	Std/m <sup>2</sup>	1,00	1,20	1,60
4	Aufandswert für die Bewehrungsarbeiten	$AW_{BW}$	Std/t	12,00	13,00	16,00
5	Aufandswert für die Betonarbeiten	$AW_{BT}$	Std/m <sup>3</sup>	0,90	1,00	1,30

Tab. 5-8 Beispielhafte Berechnung des Gesamt-Aufandswerts für Stahlbetonarbeiten – Dreiecksverteilungen

Für die PERT-Verteilungen sind die gleichen Input-Werte wie für die Dreiecksverteilungen erforderlich. Es werden dazu die gleichen minimalen, erwarteten und maximalen Werte herangezogen.

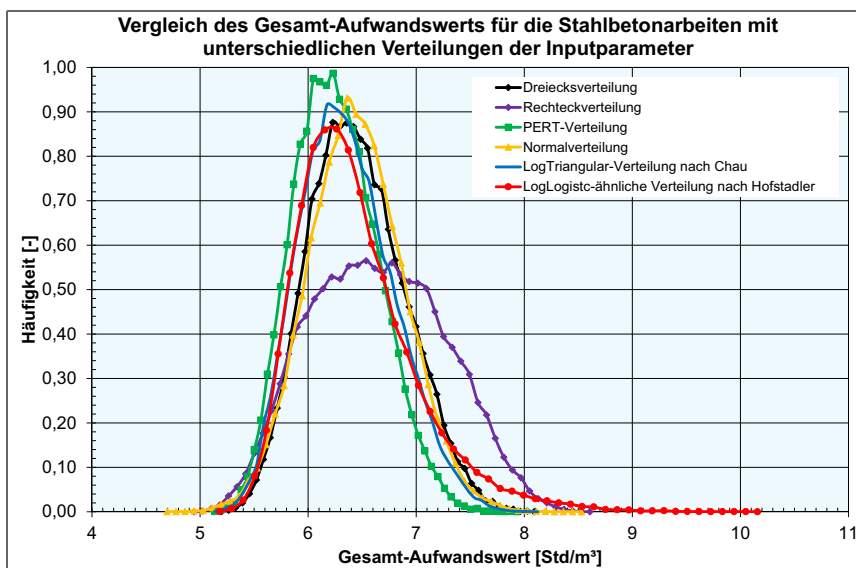
Die Rechteckverteilungen werden jeweils durch die angegebenen Minimal- und Maximalwerte definiert, ein erwarteter Wert ist hier nicht erforderlich, da die Wahrscheinlichkeit jedes Werts innerhalb der angegebenen Bandbreite gleich groß ist.

Normalverteilungen werden durch den Mittelwert und die Standardabweichung definiert. Für den Vergleich werden die Mittelwerte und Standardabweichungen der angesetzten Dreiecksverteilungen (siehe Tab. 5-8) ermittelt und als Eingabewerte für die Normalverteilungen angesetzt.

Für die LogTriangular-Verteilung nach Chau<sup>97</sup> werden ebenfalls die minimalen, erwarteten und maximalen Werte der Dreiecksverteilungen herangezogen und daraus jeweils der natürliche Logarithmus gebildet. Die aus diesen logarithmierten Werten gebildete Dreiecksverteilung wird dann in weiterer Folge noch exponiert, um die von Chau definierte Verteilung zu erhalten. Die Eingabe im Programm @Risk lautet wie folgt: =EXP(RiskTriang(LN(D);LN(E);LN(F))). Die Parameter D, E und F beziehen sich auf die Spalten der Eingabeparameter in Tab. 5-8.

Die LogLogistic-ähnliche Verteilung nach Hofstadler<sup>98</sup>, die ursprünglich nur für Aufwandswerte der Schalarbeiten ermittelt wurde, wird hier auch für die restlichen Eingangsparemeter der Glg. (5-8) angesetzt. Für die Definition dieses Verteilungstyps sind sowohl ein minimaler als auch ein erwarteter Wert erforderlich. Diese werden wiederum aus den eingangs angesetzten Dreiecksverteilungen herangezogen.

Für den Vergleich der Outputs werden immer die gleichen Arten von Verteilungsfunktionen (Dreiecks-, Rechteck-, PERT-Verteilung usw.) für die Aufwandswerte sowie für den Schalungs- und Bewehrungsgrad angesetzt. Weiters wird angenommen, dass die Eingangsparameter unabhängig voneinander sind. Für die Berücksichtigung und den Einfluss von Korrelationen wird auf Abschnitt 5.11 verwiesen.



**Abb. 5-23** Vergleich des Gesamt-Aufwandswerts für die Stahlbetonarbeiten mit unterschiedlichen Verteilungen der Inputparameter

<sup>97</sup> Vgl. Chau (1995b). Monte Carlo simulation of construction costs using subjective data. S. 378

<sup>98</sup> In Anlehnung an: Hofstadler (2014). Monte-Carlo-Simulation im Baubetrieb – Verteilungsfunktion für Aufwandswerte bei Schalarbeiten. S. 194ff

Für den Vergleich wurde die Methode von Hofstadler so abgeändert, dass als Eingabeparameter für die Definition der LogLogistic-ähnlichen Verteilung nur ein minimaler und ein erwarteter Wert erforderlich sind. Dabei dürfen die beiden Werte nicht identisch sein, da die Verteilung ansonsten nicht definiert ist.

Die Ergebnisse für den Gesamt-Aufwandswert der Stahlbetonarbeiten bei unterschiedlichen Inputverteilungen werden in Abb. 5-23 vergleichend gegenübergestellt. Die Simulation wurde mit dem Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren mit 50.000 (wiederholenden) Iterationen durchgeführt. Die Ergebnisse werden durch Linien (als „Spline“) und nicht durch klassische Histogramme dargestellt, um die Sichtbarkeit der übereinandergelegten Ergebnisse zu erhöhen.

Es zeigt sich ein Einfluss der Form von Verteilungen auf die Outputs und es sind deutliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen zu erkennen. Besonders in der Spannweite unterscheiden sich die Ergebnisse deutlich.

Die Spannweite ist bei den Ergebnissen mit LogLogistic-ähnlichen Verteilungen nach Hofstadler als Inputs besonders groß. Hier gilt es aber zu beachten, dass für dieses Beispiel Aufwandswerte über 9 Std/m<sup>3</sup> sehr unwahrscheinlich sind.

Die Unterschiede in den Outputs werden auch dadurch begründet, dass nur wenige Rechenoperationen für die Ermittlung des Gesamt-Aufwandswerts erforderlich sind. Werden eine Vielzahl von Berechnungsschritten durchgeführt, nähert sich der Output für Additionen einer Normal- und für Multiplikationen einer logarithmischen Normalverteilung an (Zentraler Grenzwertsatz). Voraussetzung ist, dass die Variablen unabhängig voneinander sind.

Dieser Vergleich zeigt, dass die Art der Verteilungen, die für Inputparameter angesetzt werden, einen deutlichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben.

## 5.8 Einfluss der Schiefe von Verteilungsfunktionen

Nicht nur die Wahl der Verteilungsfunktionen, sondern auch die Schiefe spezieller Verteilungen wirken sich auf die Ergebnisse der Simulationen aus. In diesem Abschnitt wird gezeigt, welchen Einfluss die Schiefe der Inputparameter auf die Outputs bei Anwendung der vier Grundrechenarten hat.

Dazu werden jeweils zwei Dreiecksverteilungen variierender Schiefe miteinander kombiniert und die Form der Histogramme (Ergebnisse aus Monte-Carlo-Simulationen mit 50.000 Iterationen) einander grafisch gegenübergestellt. Die Schiefe der Outputs wird in den Abbildungen auch als Zahlenwert<sup>99</sup> angegeben, um eine bessere Vergleichbarkeit sehr ähnlich anmutender Verteilungen zu gewährleisten.

Verteilung 1 ist durch eine Bandbreite zwischen 2 und 10 definiert. Innerhalb dieser Bandbreite wird der erwartete Wert variiert, sodass eine rechtsschiefe (erwarteter Wert = 4), eine symmetrische (erwarteter Wert = 6) und eine linkschiefe Verteilung (erwarteter Wert = 8) entsteht.

Verteilung 2 ist durch eine Bandbreite zwischen 4 und 20 definiert (doppelte Spannweite wie Verteilung 1). Innerhalb dieser Bandbreite wird der erwartete Wert variiert, sodass eine rechtsschiefe (erwarteter Wert = 8), eine symmetrische (erwarteter Wert = 12) und eine linkschiefe Verteilung (erwarteter Wert = 16) entsteht.

<sup>99</sup> Die Schiefe ist eine statistische Kennzahl, die die Art und Stärke der Asymmetrie einer Verteilung angibt. Ist die Schiefe < 0, spricht man von einer linksschiefen oder rechtssteilen Verteilung. Nimmt die Schiefe einen Wert > 0 an, handelt es sich um eine rechtsschiefe oder linkssteile Verteilung. Beträgt die Schiefe 0 liegt eine symmetrische Verteilung vor. Für definierte Outputs wird in @Risk die Schiefe automatisch berechnet.

### 5.8.1 Addition

Bei der Addition unabhängiger Zufallsvariablen mit endlicher und positiver Varianz gilt der zentrale Grenzwertsatz, der besagt, dass die Summe dieser Variablen annähernd normalverteilt ist. Werden jedoch nur wenige Parameter miteinander addiert, hat die Schiefe der Zufallsvariablen durchaus einen Einfluss auf die Schiefe der Summe. Hier stellt auch der Anteil eines Summanden an der Summe einen entscheidenden Faktor für die zu erwartende Schiefe des Ergebnisses dar. In Abb. 5-24 sind die Inputverteilungen (Verteilung 1 und Verteilung 2) mit unterschiedlicher Schiefe (rechtsschief, symmetrisch, linksschief) sowie die jeweiligen Summen als Histogramme dargestellt. Es fällt auf, dass sich die Schiefe der Summe an der Schiefe der Verteilung 2 (größere Bandbreite und höhere Werte) orientiert. Ist Verteilung 2 beispielsweise linksschief, weist auch die Summe tendenziell eine solche Schiefe auf. Werden Verteilungen unterschiedlicher Schiefe miteinander addiert, wirkt sich dies vermindernd auf die Schiefe der Summe aus.

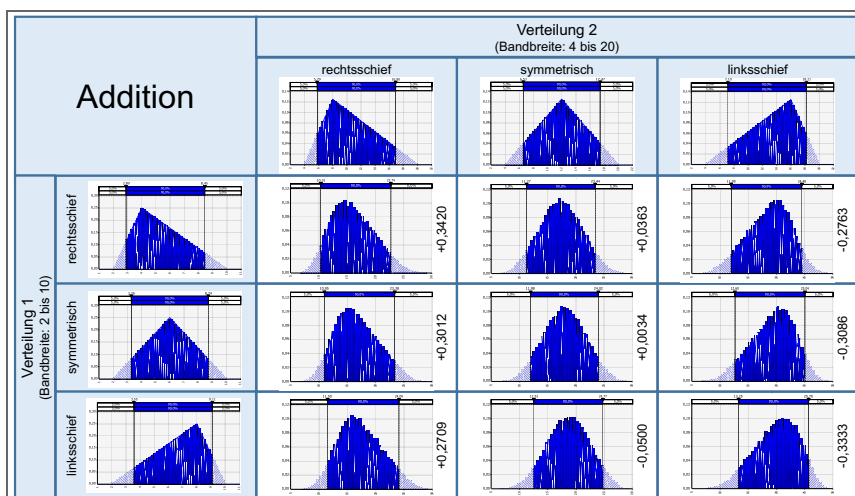


Abb. 5-24 Addition zweier Verteilungsfunktionen mit unterschiedlicher Schiefe

### 5.8.2 Subtraktion

Bei der Subtraktion der beiden angenommenen Verteilungen wird jeweils die Verteilung, die die geringeren Werte innerhalb der definierten Bandbreite aufweist (Verteilung 1) von der anderen Verteilung (2) abgezogen. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Addition. Bei der Subtraktion beeinflusst der Minuend die Schiefe der Differenz. Anders als bei der Addition wirkt sich eine unterschiedliche Schiefe der Inputs erhöhend auf die Schiefe des Outputs aus (siehe Abb. 5-25).

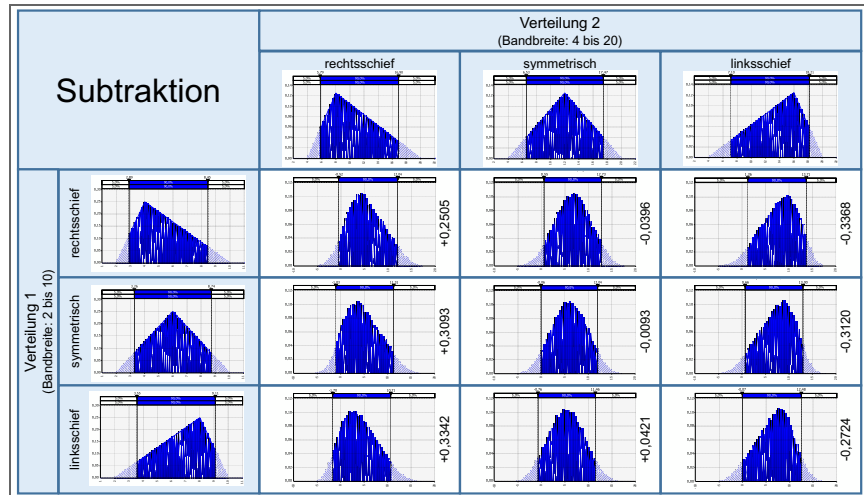


Abb. 5-25 Subtraktion zweier Verteilungsfunktionen mit unterschiedlicher Schiefe

### 5.8.3 Multiplikation

Bei der Multiplikation unabhängiger Zufallsvariablen mit endlicher und positiver Varianz ergibt sich für das Produkt annähernd eine logarithmische Normalverteilung. Dieser Umstand zeigt sich bereits bei der Multiplikation von lediglich zwei Faktoren wie in Abb. 5-26 dargestellt. Alle Histogramme für die Produkte sind rechtsschief (wenn auch mit unterschiedlich starker Ausprägung). Werden zwei linksschiefe Verteilungen miteinander multipliziert, ergibt sich eine geringere Schiefe als beispielsweise bei der Multiplikation zweier rechtsschiefer Verteilungen.

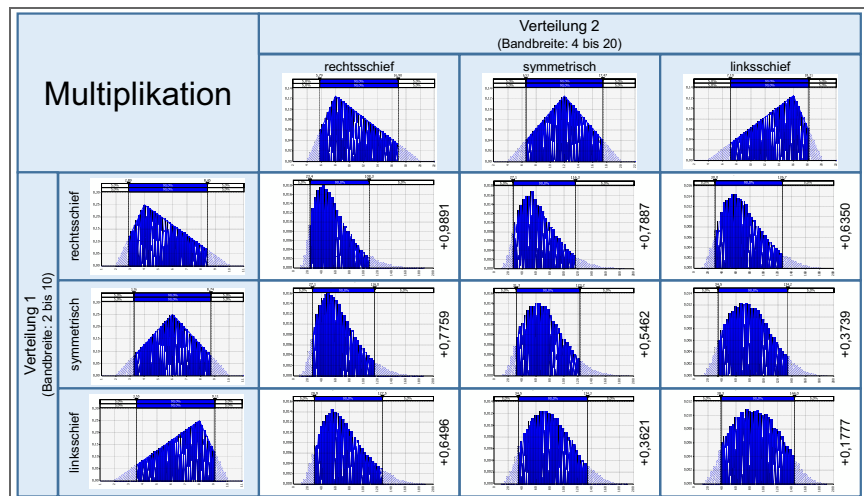


Abb. 5-26 Multiplikation zweier Verteilungsfunktionen mit unterschiedlicher Schiefe

### 5.8.4 Division

Bei der Division der beiden angenommenen Verteilungen wird jeweils die Verteilung, die höhere Werte innerhalb der definierten Bandbreite aufweist (Verteilung 2) durch die andere Verteilung (1) dividiert. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Multiplikation. Unabhängig von der Schiefe der Inputs weist der Quotient immer eine rechtsschiefe Verteilung (mit unterschiedlich starker Ausprägung) auf (siehe Abb. 5-27).

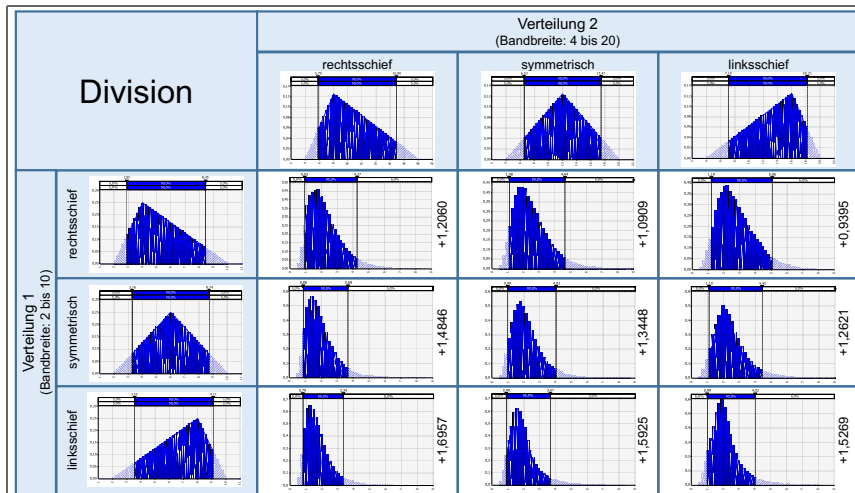


Abb. 5-27 Division zweier Verteilungsfunktionen mit unterschiedlicher Schiefe

### 5.8.5 Zusammenfassung zum Einfluss der Schiefe

Die beispielhafte Kombination zweier Dreiecksverteilungen hat gezeigt, dass die Schiefe der Inputparameter sehr wohl einen Einfluss auf die Outputs hat. Je weniger Rechenschritte durchgeführt werden, desto größer ist dieser Einfluss.

Die gezeigte grafische Gegenüberstellung der Ergebnisse einer Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division zweier Zufallsvariablen mit unterschiedlicher Schiefe kann zur Kontrolle und Plausibilitätsprüfung von Simulationsmodellen herangezogen werden. Ist der Rechenweg und die Form der Inputparameter bekannt, kann mit Hilfe der gezeigten Abbildungen auf die Form des gesuchten Outputs geschlossen werden.

Nachfolgend werden Angaben aus der Literatur dargestellt, die Empfehlungen für Verteilungsfunktionen im Bereich der Bauwirtschaft liefern.

## 5.9 Verteilungsfunktionen in der Bauwirtschaft

Die Wahl der Verteilungsfunktionen ist eine Fragestellung, die auch in der Literatur diskutiert wird. Taroun et al. halten in einer Literaturanalyse fest, dass über die Zeit eine vermehrte Tendenz von objektiven Angaben der Verteilungsfunktionen hin zu subjektiven Angaben zu erkennen ist.<sup>100</sup>

Es gibt auch Ansätze, bei denen historische Daten herangezogen werden, um daraus Verteilungen zu generieren oder die historischen Daten direkt als Input zu verwenden. Dies funktioniert bei großen Datenmengen sehr gut (Versicherungswesen, Finanzmärkte etc.), für das Bauwesen gibt es eine solche Datenbasis meist nicht.

Zimmermann et al. untersuchten die Anwendbarkeit von historischen Daten zur Definition von Verteilungsfunktionen für den operativen Bereich des Bau- und Immobilienwesens im Vergleich zum Versicherungswesen. Als Ergebnis wurde angegeben, dass aufgrund zu geringer Stichprobengrößen und einer zu hohen Anzahl an Risikoklassen die Verwendung historischer Daten für den Bereich der operativen Realisierung von Bauprojekten mit sehr hohen Unschärfen verbunden ist.<sup>101</sup>

Diese Ansicht kann nur dann geteilt werden, wenn an den absoluten Zahlen festgehalten wird und diese unreflektiert übernommen werden. Generell gilt, dass Datenmaterial, das aus internen oder externen Quellen stammt immer auf deren Anwendbarkeit, Plausibilität und Erfordernisse zur Anpassung hin überprüft werden müssen. Werden lediglich die – durch Fitting gewonnenen – Formen der Verteilungen herangezogen und mit den projektspezifischen ExpertInnenwerten sowie mit theoretischen Überlegungen (siehe Abschnitt 5.10) kombiniert, ist jedenfalls eine Ergebnisverbesserung in den Berechnungen zu vermuten.

Nachfolgend werden ausgewählte Angaben aus der Literatur – in denen bei probabilistischen Betrachtungen Verteilungsfunktionen für Eingangsparameter angesetzt wurden – wiedergegeben und vergleichend in einer Matrix gegenübergestellt.

### 5.9.1 Hruschka

Hruschka konnte anhand von Baustellenmessungen sowohl für das Herstellen von Frischbeton auf der Baustelle<sup>102</sup> (ohne Unterschied zwischen Zwangs- und Freifallmischer) als auch für Bewehrungsarbeiten<sup>103</sup> (Flechten, Verlegen, Zuschneiden) stetige, rechtsschiefe, unimodale Verteilungen nachweisen.

### 5.9.2 Schubert

Schubert schließt aus historischen Daten und theoretischen Überlegungen darauf, dass die Dichtefunktion für das Risiko des Arbeitsausfalls infolge Witterung mit einer Gammaverteilung gut angenähert werden kann.<sup>104</sup>

Für das Risiko eines geringeren Leistungsergebnisses als erwartet, das Risiko aus Änderung des Leistungsumfangs und das Preisrisiko, werden ebenfalls Gammaverteilungen vermutet.<sup>105</sup>

<sup>100</sup> Vgl. Taroun/Yang/Lowe (2011). Construction Risk Modelling and Assessment: Insights from a Literature Review. S. 87ff

<sup>101</sup> Vgl. Zimmermann/Eber/Tilke (2014). Unsicherheiten bei der Realisierung von Bauprojekten – Grenzen einer wahr-scheinlichkeitsbasierten Risikoanalyse. S. 272ff

<sup>102</sup> Vgl. Hruschka (1968). Die Anwendung des Normprodukts in der Baubetriebsplanung, Erläutert am Beispiel der Roh-bauarbeiten im Hochbau. S. 47f

<sup>103</sup> Vgl. Hruschka (1968). Die Anwendung des Normprodukts in der Baubetriebsplanung, Erläutert am Beispiel der Roh-bauarbeiten im Hochbau. S. 57f

<sup>104</sup> Vgl. Schubert (1971). Die Erfassbarkeit des Risikos der Bauunternehmung bei Angebot und Abwicklung einer Baumaß-nahme. S. 130f

<sup>105</sup> Vgl. Schubert (1971). Die Erfassbarkeit des Risikos der Bauunternehmung bei Angebot und Abwicklung einer Baumaß-nahme. S. 132; 134; 136



Bei der Verteilung von Schäden vermutet Schubert eine Exponentialverteilung als Spezialfall der Gammaverteilung. Bei Annahme von diskreten Zufallsvariablen wäre eventuell auch eine Poissonverteilung denkbar.<sup>106</sup>

Gleiches gilt auch für das Risiko aus Verzögerungen und Behinderungen des Bauablaufs.<sup>107</sup>

Gamma-, Exponential- und Poissonverteilungen haben den Nachteil, dass sie durch Formparameter definiert sind, deren Abschätzung sich als äußerst schwierig gestaltet, wenn diese durch ExpertInnen abgeschätzt werden sollen.

### 5.9.3 Golenko

Golenko untersuchte für stochastische Netzplanberechnungen mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode den Einsatz folgender Verteilungsfunktionen für die Modellierung von Vorgangsdauern:<sup>108</sup>

- Beta-Verteilungen
- Rechteckverteilungen
- Logarithmische Normalverteilungen
- Dreiecksverteilungen

Aufgrund von statistischen Daten (u.a. Multimomentaufnahmen) konnte nachgewiesen werden, dass die Annahme einer Beta-Verteilung durchaus adäquat ist.<sup>109</sup>

Grundsätzlich wird angegeben, dass eine Verteilungsfunktion für Vorgangsdauern stetig, unimodal und geschlossen (Werte  $> 0$ ) sein sollte.<sup>110</sup>

### 5.9.4 Dinort

Für Niederschlagsverteilungen konnte Dinort logarithmische Normalverteilungen aufgrund der tatsächlichen monatlichen Niederschlagsmengen (jeweils November – 1954 bis 1973) im Hochrheingebiet zwischen Konstanz und Schaffhausen (Stichprobenanzahl: 20, 30 und 90) feststellen.<sup>111</sup> Für die Anzahl an Frost- und Eistagen wurde eine Ähnlichkeit zur Binomial-, Poisson- und der Chi-Quadrat-Verteilung festgestellt (Beobachtungszeitraum: 30 Jahre).<sup>112</sup>

Für Ausfallzeiten werden Gamma-, Erlang- und Chi-Quadrat-Verteilungen als relevant angeführt.<sup>113</sup>

Dinort weist auch auf die Problematik bei der Erhebung von Daten hin. Bei einer Messreihe mit 150 Messwerten beläuft sich die Abweichung von der Grundgesamtheit auf ca.  $\pm 10\%$ . Werden im Zuge der Auswertung Histogramme durch stetige Funktionen ersetzt, so liegt die Genauigkeit innerhalb

<sup>106</sup> Vgl. Schubert (1971). Die Erfäßbarkeit des Risikos der Bauunternehmung bei Angebot und Abwicklung einer Baumaßnahme. S. 133ff

<sup>107</sup> Vgl. Schubert (1971). Die Erfäßbarkeit des Risikos der Bauunternehmung bei Angebot und Abwicklung einer Baumaßnahme. S. 135

<sup>108</sup> Vgl. Golenko (1972). Statistische Methoden der Netzplantechnik. S. 47ff

<sup>109</sup> Vgl. Golenko (1972). Statistische Methoden der Netzplantechnik. S. 48

<sup>110</sup> Vgl. Golenko (1972). Statistische Methoden der Netzplantechnik. S. 47

<sup>111</sup> Vgl. Dinort (1977). Berücksichtigung stochastischer Einflüsse in der Kostenrechnung einer Bauunternehmung. S. 29 ff

<sup>112</sup> Vgl. Dinort (1977). Berücksichtigung stochastischer Einflüsse in der Kostenrechnung einer Bauunternehmung. S. 47ff

<sup>113</sup> Vgl. Dinort (1977). Berücksichtigung stochastischer Einflüsse in der Kostenrechnung einer Bauunternehmung. S. 73ff

der beim statistischen Test (z.B. KS-Test, Chi-Quadrat-Test) gezogenen Grenzen. Weiters kommt hinzu, dass bei der Angebotskalkulation von einer Stichprobe (die Verteilung aufgrund von historischen Daten bzw. aufgrund von Erfahrungen) auf eine weitere Stichprobe geschlossen werden muss.<sup>114</sup>

### 5.9.5 Schulz

Schulz gibt an, dass aus der Erfahrung Häufigkeitsverteilungen gewonnen werden können und ein Schluss auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen vergleichbarer Vorgänge zulässig ist. Er untersuchte 712 Angebote aus Submissionen des Bauwesens und ermittelte für jede Submission den Mittelwert der Angebote und die jeweiligen Abweichungen in Prozent. Die Ergebnisse wurden als Histogramm aufgetragen und die Spannweite zwischen dem teuersten und dem günstigsten Angebot lag zwischen 55 % und 165 %, wobei 100 % den Mittelwert der Angebote je Submission darstellten. Man könnte auch sagen, dass das teuerste Angebot um ca. das dreifache höher lag als das günstigste. Schulz führt weiter an, dass bei einer größeren Anzahl an ausgewerteten Angeboten die Spannweite vermutlich noch größer gewesen wäre. Er weist auf die Unbrauchbarkeit von absoluten Streugrenzen hin.<sup>115</sup>

Den Nutzen über die Kenntnis von Streuungen von Kostenwerten führt Schulz folgendmaßen an:<sup>116</sup>

- Ein Kalkulant könnte seine eigenen Kalkulationsstreuungen mit denen seiner Kollegen oder Konkurrenten vergleichen.
- Ein Bauunternehmer kann sich die Verlustgefahr vor Augen führen, wenn er einen Auftrag zu einem, im Vergleich, niedrigen Preis erhalten hat.
- Ein Bauunternehmer müsste seine Leistungsfähigkeit und Produktivität hinterfragen, wenn er trotz knapp bemessener Preise immer weit über dem Angebot des Billigstbieters liegt.
- Ein Bauherr könnte sich fragen, um wieviel die angebotenen Preise sinken, wenn er die Zahl der Angebotsaufforderungen erhöht.

Schulz gibt an, dass für die Kalkulation diskrete Ereignisse keine große Rolle spielen; es wird zum überwiegenden Teil mit stetigen Größen gerechnet.<sup>117</sup>

Er empfiehlt die Anwendung der Normalverteilung, mit der „brauchbare Schlüsse zu ziehen sind“. Allerdings gibt er auch an, dass die Grenzen dieser beidseitig offenen Verteilung beachtet werden müssen, damit Überstrapazierungen und Fehlschlüsse unterbleiben.<sup>118</sup>

Es gilt der Grundsatz: „Sichere Aussagen sind unscharf – scharfe Aussagen sind unsicher!“<sup>119</sup>

<sup>114</sup> Vgl. Dinort (1977). Berücksichtigung stochastischer Einflüsse in der Kostenrechnung einer Bauunternehmung. S. 120

<sup>115</sup> Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 29f

<sup>116</sup> Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 34

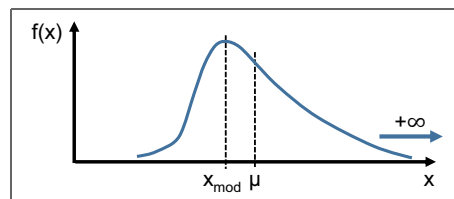
<sup>117</sup> Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 49

<sup>118</sup> Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 42

<sup>119</sup> Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 34

### 5.9.6 Lederer

Lederer bezieht sich bei seinen Ausführungen auf Vorgangsdauern und gibt an, dass es bisher ungeklärt ist, welcher Grundgesamtheit, also welchem theoretischen Verteilungstyp, die einzelnen Vorgangsgrößen entsprechen – Messungen liegen nicht vor. Fest steht nur, dass der Wertebereich einer Teilmenge von  $0 \leq x \leq \infty$  entspricht. Negative Werte können nicht vorkommen und es ist davon auszugehen, dass sich die Wahrscheinlichkeit der möglichen Werte in einem gewissen Bereich konzentriert und nach unten und oben abnimmt. Es wird von Lederer ein qualitativer Verlauf einer stetigen Verteilungsfunktion angegeben (siehe Abb. 5-28).<sup>120</sup>



**Abb. 5-28** Qualitativer Verlauf einer stetigen Wahrscheinlichkeitsfunktion für Vorgangsdauern nach Lederer<sup>121</sup>

Allgemein wird von Lederer ausgeführt, dass sich für Praktiker der Modalwert leichter abschätzen lässt als der Erwartungswert und die Grenzwerte (Minimum und Maximum) leichter als die Standardabweichung.<sup>122</sup>

Für sein Berechnungsmodell verwendet Lederer, nachdem er Trapez- und Rechteckverteilungen anführt, allerdings Dreiecksverteilungen. Er begründet dies damit, dass Praktiker meist überfordert sind, wenn sie Eckpunkte der oberen Trapezseite angeben sollen. Der große Vorteil der Dreiecksverteilung (und auch der PERT-Verteilung) ist, dass diese durch drei Werte (Minimalwert, Modalwert und Maximalwert) definiert ist.<sup>123</sup>

### 5.9.7 Strehl

In seiner Dissertation ermittelte Strehl anhand von Nachkalkulationswerten einer Großbaustelle für sechs Teilleistungen (Schalen und Betonieren von Säulen, Wänden und Decken) Verteilungsfunktionen für Aufwandswerte. Für jede der Teilleistungen wurden 50 Nachkalkulationswerte erhoben, in Form von Histogrammen dargestellt und jeweils eine Gammaverteilung angepasst.<sup>124</sup>

Da Strehl die Nachkalkulationsdaten in Tabellenform<sup>125</sup> in seiner Dissertation veröffentlicht hat, ist ein Fitting (Datenanpassung) theoretischer Verteilungen mit Hilfe von @Risk möglich. Wird der KS-Test<sup>126</sup> herangezogen, ergeben

<sup>120</sup> Vgl. Lederer (1982). Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung. S. 57

<sup>121</sup> Vgl. Lederer (1982). Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung. S. 57

<sup>122</sup> Vgl. Lederer (1982). Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung. S. 60

<sup>123</sup> Vgl. Lederer (1982). Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung. S. 61ff

<sup>124</sup> Vgl. Strehl (1983). Ein Modell für die Ermittlung eines Angebotspreises von Bauleistungen bei stochastischer Kostenermittlung. S. 22ff

<sup>125</sup> Vgl. Strehl (1983). Ein Modell für die Ermittlung eines Angebotspreises von Bauleistungen bei stochastischer Kostenermittlung. S. 23

sich durch das Fitting für die Betonierarbeiten für alle drei betrachteten Bauteile LogLogistic-Verteilungen. Bei den Schalungsarbeiten liefert das Fitting für die Wände und Decken jeweils eine PERT-Verteilung und für die Stützen eine Rayleigh-Verteilung als beste Anpassung an die vorhandenen Daten.

### 5.9.8 Liberda

Liberda wählt in seiner Dissertation die Gammaverteilung für Leistungsansätze (Aufwandswerte) und konnte auch aus Nachkalkulationen gute Übereinstimmungen feststellen (zwischen 10 und 20 Datenpunkte je ausgewerteter Position).<sup>127</sup> Für den Bruttomittellohn nimmt Liberda eine Normalverteilung an, verweist aber darauf, dass auch eine schiefe Verteilung denkbar wäre.<sup>128</sup>

### 5.9.9 Iwan

Iwan verwendet für die Modellierung von Vorgangsdauern nachstehende Verteilungen, gibt aber zu bedenken, dass es bei einzelnen Verteilungstypen ohne eine untere Begrenzung zu unrealistisch kurzen Vorgangsdauern in den Simulationen kommen würde.<sup>129</sup>

- Exponentialverteilung
- Rechteckverteilung
- Normalverteilung
- Erlangverteilung

Für die Erlangverteilung wird angeführt, dass mit dieser aufgrund ihrer asymmetrischen Form eine große Anzahl an Bauproduktionsprozessen wiedergegeben werden kann.<sup>130</sup>

In einem konkreten Beispiel wird die Exponentialverteilung für Ausfall- und die Erlangverteilung für Zwischenausfallzeiten angesetzt (unter Verwendung von Bautagebuchaufzeichnungen).<sup>131</sup>

### 5.9.10 Chau

Chau untersuchte anhand von ExpertInneneinschätzungen die Gültigkeit der Dreiecksverteilungen bei der Berechnung von Baukosten mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode. Es wurden dabei 10 Kostenkomponenten für Elektroinstallationen von sieben erfahrenen ExpertInnen geschätzt. Die ExpertInnen sollten für jede der untersuchten Positionen einen minimalen, einen erwarteten und einen maximalen Wert angeben. Dies geschah in mehreren Phasen<sup>132</sup>, bis

<sup>126</sup> Der Kolmogorow-Smirnow-Test ist ein statistischer Test auf Übereinstimmung zweier Wahrscheinlichkeitsverteilungen und besonders für kleine Stichproben geeignet.

<sup>127</sup> Vgl. Liberda (1985). Ermittlung des Kalkulationswagnisses im Bauwesen durch stochastische Berechnung der Herstellkosten. S. 37 ff

<sup>128</sup> Vgl. Liberda (1985). Ermittlung des Kalkulationswagnisses im Bauwesen durch stochastische Berechnung der Herstellkosten. S. 76

<sup>129</sup> Vgl. Iwan (1992). Beitrag zur Anwendung der Simulation und Reihenfolgeoptimierung bei der Analyse von Bauproduktionsprozessen. S. 116ff

<sup>130</sup> Vgl. Iwan (1992). Beitrag zur Anwendung der Simulation und Reihenfolgeoptimierung bei der Analyse von Bauproduktionsprozessen. S. 137

<sup>131</sup> Vgl. Iwan (1992). Beitrag zur Anwendung der Simulation und Reihenfolgeoptimierung bei der Analyse von Bauproduktionsprozessen. S. 163f

<sup>132</sup> nach dem Prinzip der „Delphi-Methode“

die ExpertInnen mit ihrer Wahl zufrieden waren. Auffällig bei dieser Untersuchung war, dass sich der erwartete Wert in den meisten Fällen näher am Minimum als am Maximum befand. Dies wird von Chau dadurch erklärt, dass es eine theoretische untere Grenze der Baukosten gibt, die durch den minimalsten Einsatz an Ressourcen bestimmt ist, aber eine obere Grenze nicht existiert. Somit hat jeder/jede Experte/Expertin aufgrund seiner/ihrer persönlichen Erfahrungen eine andere Sichtweise darauf, wie hoch die maximalen Kosten werden können. In einer zweiten Befragungsrunde sollten die ExpertInnen einschätzen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ihre erwarteten Werte jeweils überschritten werden. Diese Einschätzungen wurden mit der errechneten Überschreitungswahrscheinlichkeit für die erwarteten Werte, auf Basis von Dreiecksverteilungen, verglichen. In den meisten Fällen lag die errechnete Wahrscheinlichkeit weit über der subjektiv angegebenen der ExpertInnen. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Dreiecksverteilung der Eingangswerte eine zu große Verzerrung hin zu den Maximalwerten bewirkt. Chau gibt für die Form der Verteilungsfunktion – zunächst nur qualitativ – eine rechtsschiefe Verteilung (auch Verteilung mit positiver Schiefe genannt), wie sie in Abb. 5-29 dargestellt ist, an.<sup>133</sup>

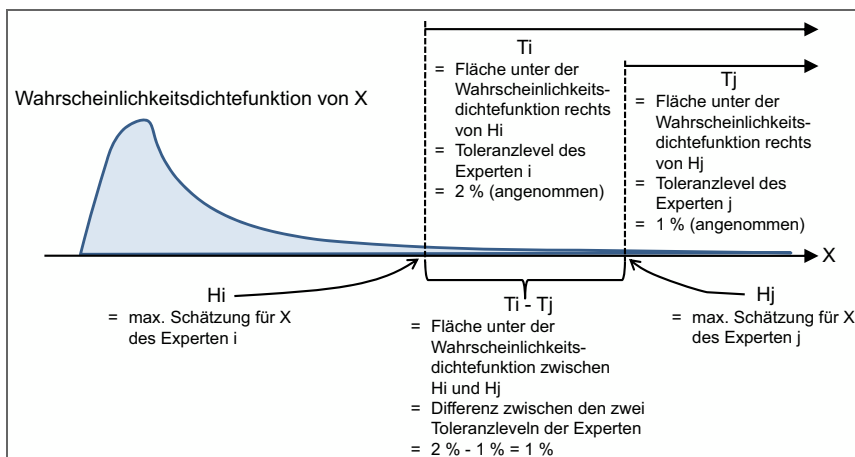


Abb. 5-29 Rechtsschiefe Verteilung für Baukosten (qualitative Darstellung)<sup>134</sup>

Diese Form könnte zwar durch eine Log-Normalverteilung sehr gut angenähert werden, allerdings sind die Eingabewerte (Mittelwert und Standardabweichung) von ExpertInnen nur schwer abzuschätzen. Außerdem weist diese Verteilung keine obere Grenze auf – d.h. sie reicht bis  $\infty$ .<sup>135</sup>

Eine weitere Annäherung kann durch die Beta-Verteilung geschaffen werden. Diese Funktion ist allerdings durch 4 Parameter (Minimum, Maximum und 2 Formparameter) gekennzeichnet und somit auch nicht mit den üblicherweise erfassten Daten (Minimum, erwarteter Wert und Maximum) zu beschreiben.<sup>136</sup>

<sup>133</sup> Chau (1995a). The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. S. 15ff

<sup>134</sup> Vgl. Chau (1995a). The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. S. 19

<sup>135</sup> Vgl. Chau (1995a). The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. S. 19

<sup>136</sup> Vgl. Chau (1995a). The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. S. 19

Die PERT-Verteilung stellt eine Zwischenstufe zwischen einer Dreiecksverteilung und einer Beta-Verteilung dar. Einerseits wird sie, wie die Dreiecksverteilung, von nur 3 Parametern (Minimum, erwarteter Wert und Maximum) beschrieben, andererseits ist die PERT-Verteilung ein spezieller Fall einer Beta-Verteilung, da die beiden fehlenden Formparameter aus den drei angegebenen Werten errechnet werden.<sup>137</sup>

Chau schlägt an anderer Stelle eine konkrete rechtsschiefe Verteilung vor, welche die selben Eingangsparameter verwendet wie die Dreiecksverteilung (Minimum, erwarteter Wert und Maximum), den niedrigeren Werten jedoch eine größere Wahrscheinlichkeit zuordnet als den höheren. Er bezeichnet diese Verteilung als LogTriangular-Verteilung. Es handelt sich dabei um eine exponentielle Transformation der Dreiecksfunktion. Die Vorteile dieser Verteilung sind, dass der Modus unverändert bleibt, die Eingabe durch einen einfachen Befehl<sup>138</sup> erfolgt und keine zusätzlichen Daten dafür erforderlich sind.<sup>139</sup>

Bei der Anwendung der LogTriangular-Verteilung nach Chau ist anzumerken, dass die Eingabe des Werts 0 nicht möglich ist, da der natürliche Logarithmus von 0 nicht definiert ist.<sup>140</sup> Weiters ergibt sich ein, von der gewünschten Form abweichendes Bild der Verteilung, wenn der Modalwert näher beim Maximalwert, als beim Minimum liegt. Ein Zahlenbeispiel soll die Problematik der LogTriangular-Verteilung verdeutlichen.

### Anwendungsbeispiel für die LogTriangular-Verteilung nach Chau

Als Ausgangsverteilung wird eine Dreiecksverteilung mit den Parametern: 2; 4 und 10 angenommen. Diese Verteilung soll durch den Zusammenhang von Chau in eine LogTriangular-Verteilung übergeführt werden. Zunächst muss dafür der natürliche Logarithmus der drei Parameter gebildet werden:

- $\ln(2) = 0,693$
- $\ln(4) = 1,386$
- $\ln(10) = 2,303$

Diese drei Werte werden nun in die @Risk-Funktion nach Chau eingesetzt. Die entsprechende Eingabe in der Befehlszeile von Excel lautet: =EXP(RiskTriang(LN(2);LN(4);LN(10))). Die beiden Verteilungen (Dreiecks- und LogTriangular-Verteilung) sind in Abb. 5-30 gegenübergestellt.

<sup>137</sup> Vgl. Palisade Corporation (2013). Benutzerhandbuch – @Risk. S. 723

<sup>138</sup> Chau verwendete für seine Berechnungen ebenfalls das Programm @Risk in der Version 1.55. Die Implementierung der LogTriangular-Verteilung erfolgt mit dem Befehl: =EXP(RiskTriang(LN(ERW);LN(ERW);LN(MAX))). Hierbei stehen MIN, ERW und MAX für die drei vorgegebenen Parameter (minimaler, erwarteter und maximaler Wert).

<sup>139</sup> Vgl. Chau (1995b). Monte Carlo simulation of construction costs using subjective data. S. 378

<sup>140</sup>  $\ln(0)$  = nicht definiert!

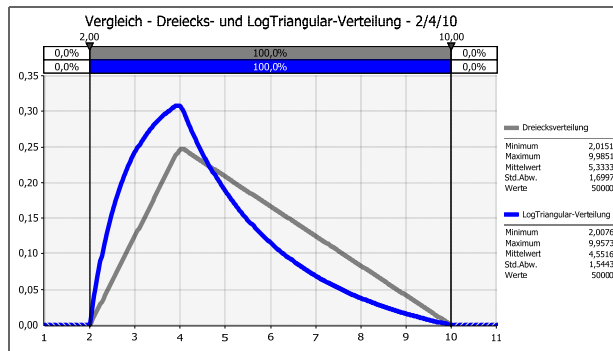


Abb. 5-30 Vergleich – Dreiecksverteilung (grau) und LogTriangular-Verteilung (blau) mit den Eingabewerten 2/4/10

Die Form der LogTriangular-Verteilung entspricht jener, die auch von Chau qualitativ angegeben wurde. Allerdings ändert sich diese angestrebte Form, wenn der Modalwert näher zum Maximalwert rückt. Als Beispiel wird der Modalwert (erwarteter Wert) von 4 auf 8 verschoben. Der funktionale Zusammenhang für die Definition der LogTriangular-Verteilung bleibt unverändert. Ein Vergleich der geänderten Verteilung ist in Abb. 5-31 dargestellt. Die LogTriangular-Verteilung weicht nun stark von der ursprünglichen, von Chau angestrebten Form ab. Es hat sich auch der ursprünglich mit 8 angegebene Modalwert auf ca. 5,5 verschoben.

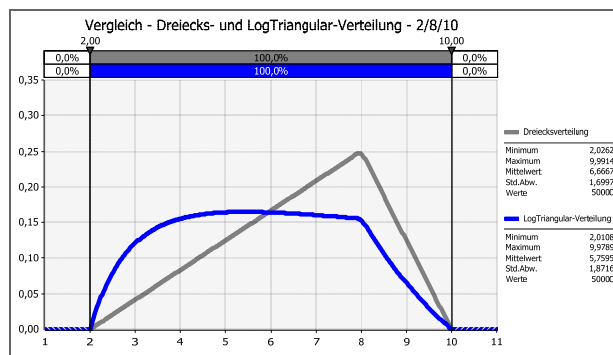


Abb. 5-31 Vergleich – Dreiecksverteilung (grau) und LogTriangular-Verteilung (blau) mit den Eingabewerten 2/8/10

Anknüpfend an die Überlegungen von Chau wird eine weitere Möglichkeit gezeigt, wie die von Chau angegebene Form der Verteilungsfunktion auch modelliert werden könnte.

### Weiterentwicklung des Ansatzes von Chau

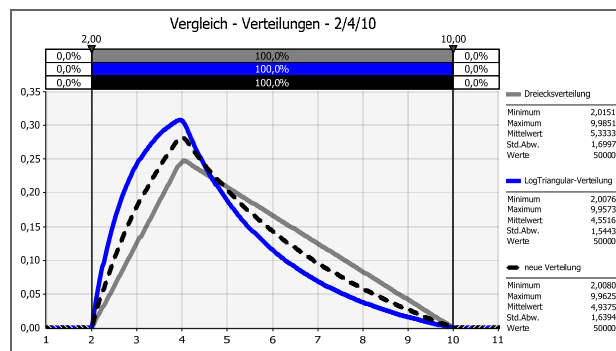
Die Probleme bei der von Chau vorgeschlagenen LogTriangular-Verteilung wurden bereits aufgezeigt. Aufbauend auf die Vorgehensweise von Chau wurde ein weiteres Verfahren entwickelt, mit dem sich die vorgeschlagene Verteilungsform ebenfalls modellieren lässt.

Als Ausgangswert dient wieder eine Dreiecksverteilung, definiert durch einen minimalen, erwarteten und maximalen Wert. Für die neue Verteilung wird

zunächst die Quadratwurzel aus diesen drei Werten gezogen. Für das oben angeführte Beispiel ergeben sich folgende Werte:

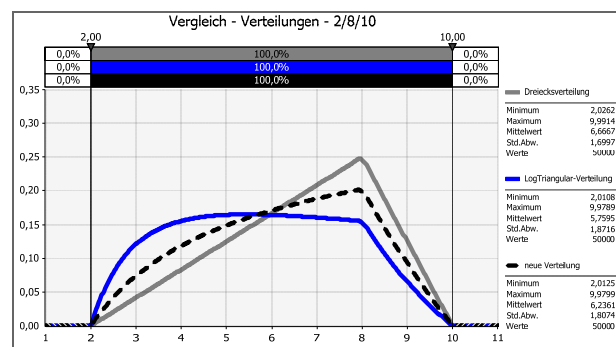
- Quadratwurzel aus 2 = 1,414
- Quadratwurzel aus 4 = 2,000
- Quadratwurzel aus 10 = 3,162

Diese drei Werte werden nun in die @Risk-Funktion für eine gewöhnliche Dreiecksfunktion eingesetzt und der gesamte Ausdruck quadriert. Die entsprechende Eingabe in der Befehlszeile von Excel lautet:  $=\text{(RiskTriang(Wurzel(2);Wurzel(4);Wurzel(10)))}^2$ . Die ursprüngliche Dreiecksverteilung, die LogTriangular-Verteilung nach Chau und die neu entwickelte Verteilung sind in Abb. 5-32 einander vergleichend gegenübergestellt.



**Abb. 5-32** Vergleich – Dreiecksverteilung (grau), LogTriangular-Verteilung (blau) und neue Verteilung (strichliert) mit den Parametern 2/4/10

Die Ausprägung der gewünschten Form ist zwar nicht so markant wie bei der Verteilung nach Chau, doch auch wenn der Modus näher beim Maximalwert als beim Minimalwert liegt, entspricht die neue Verteilung noch eher der vorgegebenen Form nach Chau. Weiters bleibt der Modalwert bei der neuen Verteilung unverändert gegenüber der ursprünglichen Dreiecksverteilung (siehe Abb. 5-33).

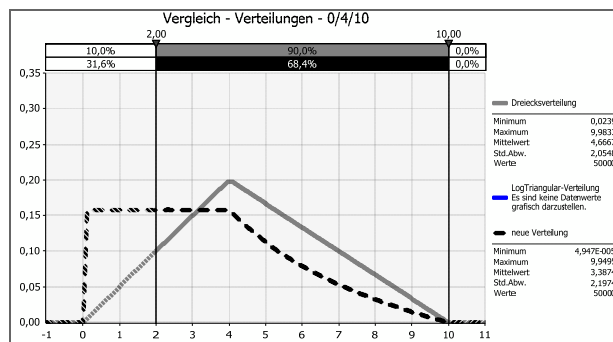


**Abb. 5-33** Vergleich – Dreiecksverteilung (grau), LogTriangular-Verteilung (blau) und neue Verteilung (strichliert) mit den Parametern 2/8/10



Die neue Verteilung hat auch den Vorteil, dass der Wert 0 eine zulässige Eingabe darstellt, ohne eine undefinierte Verteilung zu liefern (siehe Abb. 5-34).

Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die neue Verteilung zwischen null und dem erwarteten Wert einen konstanten Verlauf aufweist. Dieser Umstand muss bei Verwendung dieser neuen Verteilung unbedingt beachtet werden. Ein Grenzfall wäre dann gegeben, wenn für die Eingabe das Minimum bei null und der erwartete gleich dem maximalen Wert ist. Dann ergibt sich nämlich eine Rechteckverteilung für die gezeigte Eingabevorschrift.



**Abb. 5-34** Vergleich – Dreiecksverteilung (grau), LogTriangular-Verteilung (blau – hier nicht dargestellt, da der  $\ln(0)$  nicht definiert ist) und neue Verteilung (strichliert) mit den Parametern 0/4/10

Die neue Verteilung nimmt den Ansatz von Chau auf und setzt diesen mittels einer anderen Eingabefunktion um. Dadurch werden die angeführten Nachteile der LogTriangular-Verteilung nach Chau umgangen, wobei aber die grundsätzliche Form – die von Chau vorgeschlagen wurde – erhalten bleibt und auch nur drei Eingabewerte (Minimum, erwarteter Wert, Maximum) für deren Definition erforderlich sind. Sowohl für die LogTriangular-Verteilung als auch für die neu entwickelte Verteilung gilt, dass negative Werte als Inputs nicht zulässig sind.

### 5.9.11 Raftery

Raftery gibt an, dass es bei der Wahl der Verteilungsfunktionen darum geht, die Einschätzungen des Kalkulanten für Bandbreiten und Wahrscheinlichkeiten der Eingangsparameter zu modellieren. Es handelt sich dabei nicht um wiederholbare statistische Einschätzungen, sondern um subjektive Definitionen der Wahrscheinlichkeit. Die Verteilungsfunktionen sollten deshalb leicht zu verstehen sein und klare Grenzpunkte haben (keine offenen Verteilungen). Da die meisten Kalkulanten einschätzen können, dass eine bestimmte Variable nie über bzw. unter einen gewissen Wert steigen bzw. sinken wird. Raftery schlägt folgende theoretische Verteilungsfunktionen vor und empfindet diese auch als durchaus leistungsfähig:<sup>141</sup>

- Rechteckverteilung
- Dreiecksverteilung

<sup>141</sup> Vgl. Raftery (1999). Risk Analysis in Project Management. S.85ff

- Trapezverteilung
- Stufenweise Rechteckverteilung
- Diskrete Verteilung

Durch Erfahrungen bei vielen Projekten konnte gezeigt werden, dass mit diesen Verteilungsfunktionen robuste Modelle für Risiken ermittelt werden konnten.<sup>142</sup>

Das Problem der Wahl von Verteilungsfunktionen für Inputparameter ist lt. Raftery nicht so bedeutend wie die Frage der Korrelationen zwischen den Untersystemen eines Projektmodells.<sup>143</sup>

### 5.9.12 Link

Link führt in ihrer Dissertation an, dass die Zuverlässigkeit einer Risikoanalyse sehr stark von der richtigen Zuordnung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die die Unsicherheiten der einzelnen Risiken wirklickeitsgetreu abbilden sollen, abhängt.<sup>144</sup>

Sie gibt weiters an, dass die Lebensdauer von Werkstücken mit einer Exponentialverteilung simuliert werden kann.<sup>145</sup>

Link geht auch speziell auf die Beschränkung von Verteilungen ein und gibt zu bedenken, dass unrealistische Werte bereits beim Ansatz der Verteilungen für die Inputs evtl. begrenzt werden müssen. Als Beispiel wird die Dauer des Bauablaufs angeführt, die nicht unter einen minimalen Wert sinken kann, auch wenn diese beispielsweise durch eine Normalverteilung modelliert wird. Müssen künstliche Schranken eingeführt werden, ist zu prüfen, ob der richtige Verteilungstyp gewählt wurde.<sup>146</sup>

Für ExpertInnen-schätzungen werden geometrische Verteilungen (z.B. Dreiecksverteilungen, Rechteckverteilungen) empfohlen. Theoretische bzw. statistische Verteilungen (z.B. Log-Normalverteilung) sind lt. Link dann anzuwenden, wenn:<sup>147</sup>

- die der Verteilung zugrunde liegende Theorie zum individuellen Problem passt,
- eine spezielle Verteilung allgemein für ein individuelles Problem anerkannt ist,
- die Verteilung der ExpertInnenmeinung entspricht,
- kein allzu hoher Genauigkeitsgrad vorausgesetzt wird.

Link gibt weiters an, dass die Wahl einer Verteilung umso leichter ist, je weniger Informationen über ein Risiko vorhanden sind.<sup>148</sup>

Dieser Aussage kann nicht zugestimmt werden, da erst durch die Kenntnis über theoretische Charakteristika eines Parameters bestimmte Verteilungen ausgeschlossen werden können. Liegen keinerlei Informationen vor und wird

<sup>142</sup> Vgl. Raftery (1999). Risk Analysis in Project Management. S. 85

<sup>143</sup> Vgl. Raftery (1999). Risk Analysis in Project Management. S. 89

<sup>144</sup> Vgl. Link (1999). Risikobewertung von Bauprozessen – Modell ROAD – Risk and Opportunity Analysis Device. S. 93

<sup>145</sup> Vgl. Link (1999). Risikobewertung von Bauprozessen – Modell ROAD – Risk and Opportunity Analysis Device. S. 58

<sup>146</sup> Vgl. Link (1999). Risikobewertung von Bauprozessen – Modell ROAD – Risk and Opportunity Analysis Device. S. 100

<sup>147</sup> Vgl. Link (1999). Risikobewertung von Bauprozessen – Modell ROAD – Risk and Opportunity Analysis Device. S. 100

<sup>148</sup> Vgl. Link (1999). Risikobewertung von Bauprozessen – Modell ROAD – Risk and Opportunity Analysis Device. S. 100

eine Verteilung unreflektiert angesetzt, kann dies zu deutlich falschen Ergebnissen im Zuge der Simulation führen.

### 5.9.13 Werner

Werner verwendet in seinen Simulationen grundsätzlich nur Rechteck-, Normal- und PERT-Verteilungen. Er begründet die Auswahl dieser Verteilungen mit Literaturangaben und der Auswertung von Multimomentaufnahmen (Normalverteilungen) im Zuge von Diplomarbeiten. Rechteckverteilungen (= Gleichverteilungen) werden dann angesetzt, wenn zu einem Vorgang nur sehr wenig Daten ( $< 3$ ) vorliegen und die Verwendung eines Mittelwerts statistisch nicht begründet werden kann. Das Simulationsmodell von Werner baut für die Ermittlung von Kosten- und Zeitriskien auf Stammdaten und einer netzplanorientierten Projektplanung auf.<sup>149</sup>

### 5.9.14 Raaber

Raaber betrachtet die Kostenermittlung bei Bauprojekten und geht dabei besonders auf Unsicherheiten von Mengen- und Kostenansätzen ein. Er gibt an, dass stets eine gewisse Bandbreite der Werte angegeben werden kann (geschlossene Verteilungen) und es oft begründet ist, dass Ergebnisse in der Nähe eines bestimmten Wertes eine höhere Eintrittswahrscheinlichkeit aufweisen (unimodale Verteilung). Weiters wird angeführt, dass die Verteilungen meist unsymmetrisch sein werden. Wird eine Normalverteilung angesetzt, sind praktische Ober- und Untergrenzen zu beachten. Raaber schlägt für die Modellierung Dreiecks- und parabolische Verteilungen, seltener rechteckige vor.<sup>150</sup>

### 5.9.15 Rohr

Rohr leitet aus theoretischen Überlegungen zusammen mit Ergebnissen von Zeitaufnahmen mögliche Verteilungen für Vorgangsdauern ab. Folgende Eigenschaften für die Modellierung von Vorgangsdauern mittels Verteilungsfunktionen werden angegeben:

- "Die Zeit ist eine stetige Zufallsgröße, was zu stetigen Verteilungen führt.
- Eine bestimmte Mindestdauer kann niemals unterschritten werden. Die Verteilung von Zeitwerten muss also auf einen positiven Definitionsbereich beschränkbar sein.
- Eine Konzentration der Dauern um einen bestimmten Wert ist anzunehmen und entspricht auch den typischen Histogrammen aus Zeitaufnahmen. Die Verteilung ist als eingipflig anzunehmen.
- Ein Vorgang kann unter besonders ungünstigen Umständen außergewöhnlich lange dauern. Die Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Umstände ist aber auch unterproportional häufig. Eine obere Grenze für den Definitionsbereich ist nicht unbedingt notwendig, da unendlich lange Dauern auch unendlich unwahrscheinlich sind. Damit ergibt sich ein rechtschiefer (linkssteiler) Graph der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Dies entspricht auch den Histogrammen realer Zeitaufnahmen. Linksschiefe

<sup>149</sup> Vgl. Werner (2002). Datenbankgestützte Risikoanalyse von Bauprojekten. S. 51ff

<sup>150</sup> Vgl. Raaber (2003). Beitrag zu Ausschreibung und Vergabe von Bauleistungen. S. 167f

und symmetrische Verteilungen widersprechen jeder Erfahrung und scheiden daher aus.“<sup>151</sup>

Aufgrund dieser Überlegungen wurden von Rohr in seinen weiteren Untersuchungen folgende stetige, eingipflige, rechtsschiefe und auf den positiven Wertebereich beschränkte Verteilungen ausgewählt.<sup>152</sup>

- Beta-Verteilung
- Dreiparametrische Gammaverteilung
- Dreiparametrische inverse Gauß-Verteilung
- Dreiparametrische Lognormal-Verteilung
- Dreiparametrische Weibull-Verteilung

Für seine Modellberechnungen verwendet Rohr in weiterer Folge inverse Gauß-Verteilungen, gibt jedoch an, dass die Entscheidung „mehr oder weniger willkürlich ohne strenge mathematische Kriterien erfolgt“.<sup>153</sup>

#### 5.9.16 Schach

Schach gibt im Zuge von Investitionskostenberechnungen für Verkehrsinfrastrukturprojekte an, dass für Kostenansätze nur Verteilungen, die nach oben und unten begrenzt sind in Frage kommen. Als geeignete Verteilungen für Investitionskostenbetrachtungen werden Rechteck-, Dreiecks-, Beta- und PERT-Verteilungen angeführt – die Normalverteilung wird explizit ausgeschlossen. Lt. Schach wird man bei Kostenverteilungen sehr häufig von rechtsschiefen Verteilungen ausgehen müssen, da die Minimalkosten näher beim Erwartungswert liegen, maximale Kosten jedoch sehr weit vom Erwartungswert entfernt sein können. Rechteckverteilungen werden dann eingesetzt, wenn alle Werte zwischen minimalen und maximalen Kostenansatz die gleiche Wahrscheinlichkeit aufweisen. Für ein konkretes Beispiel wurden Verteilungen in Anlehnung an einen Kostenkennwertekatalog, Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie sowie unter Mitwirkung erfahrener Kalkulanten bestimmt.<sup>154</sup>

#### 5.9.17 Feik

Feik führt aus, dass die Wahl der Verteilungsfunktionen eine entscheidende Grundlage der Risikoanalyse darstellt und dass es oft notwendig ist offene Verteilungen zu beschränken, um unrealistische Ergebnisse ausschließen zu können.<sup>155</sup>

Er verwendet für die Bewertung von Einzelrisiken Dreiecksverteilungen, da diese mit möglichst wenigen, prägnanten Parametern eine einfache und überschaubare Anwendung versprechen.<sup>156</sup>

<sup>151</sup> Rohr (2005). Optimierung der Bauproduktion durch Simulation von Prozessen. S. 44

<sup>152</sup> Vgl. Rohr (2005). Optimierung der Bauproduktion durch Simulation von Prozessen. S. 44

<sup>153</sup> Vgl. Rohr (2005). Optimierung der Bauproduktion durch Simulation von Prozessen. S. 61

<sup>154</sup> Vgl. Schach (2005). Stochastische Investitionskostenberechnung für Verkehrsinfrastrukturprojekte. S. 114

<sup>155</sup> Vgl. Feik (2006). Elektronisch gestütztes Risikomanagement im Bauwesen – Ein Konzept eines elektronischen Chancen- und Gefahrenmanagementsystems für Auftraggeber. S. 207

<sup>156</sup> Vgl. Feik (2006). Elektronisch gestütztes Risikomanagement im Bauwesen – Ein Konzept eines elektronischen Chancen- und Gefahrenmanagementsystems für Auftraggeber. S. 104f

### 5.9.18 Girmscheid/Motzko

Für die Berechnung von Risikokosten wird von Girmscheid/Motzko auch die Monte-Carlo-Simulation als mögliche Methode angegeben. Es wird darauf hingewiesen, dass die Unschärfen, mit denen die Eingabegrößen behaftet sind, durch Erfahrungswerte und ExpertInnenmeinungen abzuschätzen sind. Als häufig verwendete Verteilungsfunktion für den möglichen Schaden eines Risikos wird die PERT-Verteilung genannt, die durch einen minimalen, einen erwarteten und maximalen Wert definiert wird.<sup>157</sup>

### 5.9.19 Girmscheid/Busch

Girmscheid/Busch geben an, dass in der praktischen Modellierung auch für diskrete Variablen stetige Verteilungen verwendet werden, wenn die Lücke zwischen zwei möglichen Ereignissen insignifikant ist. Als Beispiel wird die Modellierung von Projektkosten angeführt, die eigentlich bei einer bestimmten Auflösung (z.B. €) nur eine endliche Ereignismenge (Merkmalsausprägung) besitzen.<sup>158</sup>

Hinsichtlich der Beschränkung von Verteilungsfunktionen wird angeführt, dass es in manchen Anwendungsfällen notwendig ist, unbeschränkte (beidseitig offene) Verteilungen nachträglich zu beschränken, um Ereignisse zu vermeiden, die keinen Sinn machen.<sup>159</sup>

Weiters werden tabellarisch unterschiedliche stetige und diskrete Verteilungen mit möglichen Anwendungsbereichen (allgemein und bei der Risikoanalyse) angegeben.<sup>160</sup> Diese werden in der Zusammenfassung der Literaturansätze für Verteilungsfunktionen in Abschnitt 5.9.27 dargestellt.

### 5.9.20 Demmler

Demmler wählt für ein Berechnungsbeispiel der Herstellzeit eines Tunnelbauwerks für die Bruttovortriebsleistung eine Rechteck- und für geplante Ausfallzeiten eine Dreiecksverteilung. Die Wahl der Verteilungen wird damit begründet, dass Vergleichswerte aus durchgeführten Projekten vorlagen.<sup>161</sup>

### 5.9.21 Hauwermeiren/Vose

Hauwermeiren/Vose geben in einem eigenen Nachschlagewerk unterschiedliche Verteilungen mit den entsprechenden Anwendungsgebieten und Einsatzmöglichkeiten an. Jene, die auch im Baubetrieb und der Bauwirtschaft von Bedeutung sind, werden nachfolgend mit den vorgeschlagenen Verteilungsfunktionen angeführt.<sup>162</sup>

#### Risikokosten

Es werden rechtsschiefe stetige Verteilungen empfohlen wie z.B.:<sup>163</sup>

<sup>157</sup> Vgl. Girmscheid/Motzko (2007). Kalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen – Grundlagen, Methodik und Organisation. S. 315f bzw. vgl. Girmscheid/Motzko (2013). Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft – Produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung. S. 359f

<sup>158</sup> Vgl. Girmscheid/Busch (2008). Unternehmensrisikomanagement in der Bauwirtschaft. S. 88

<sup>159</sup> Vgl. Girmscheid/Busch (2008). Unternehmensrisikomanagement in der Bauwirtschaft. S. 89

<sup>160</sup> Vgl. Girmscheid/Busch (2008). Unternehmensrisikomanagement in der Bauwirtschaft. S. 90f

<sup>161</sup> Vgl. Demmler (2009). Risikomanagement im internationalen Tunnelbau unter Anwendung der Vertragsform FIDIC Red Book. S. 215f

<sup>162</sup> Vgl. Hauwermeiren/Vose (2009). A Compendium on Distributions. S. 11f (Online unter: <http://www.vosesoftware.com/content/ebook.pdf>. Datum des Zugriffs: 21.01.2015)

- Exponentialverteilungen
- LogGamma-Verteilungen
- LogLogistic-Verteilungen
- Log-Normalverteilungen
- Pareto-Verteilungen

### ExpertInnenmeinungen

Für ExpertInnenmeinungen bzw. ExpertInneneinschätzungen werden z.B. folgende Verteilungen empfohlen, da sie intuitiv, leicht zu kontrollieren und/oder flexibel sind:<sup>164</sup>

- Bernoulli-Verteilung
- diskrete Verteilung
- PERT-Verteilung
- Dreiecksverteilung
- Rechteckverteilung

#### 5.9.22 Gleißner

Gleißner wendet die Monte-Carlo-Simulation im Risikomanagement von Unternehmen an und führt für die quantitative Beschreibung von Risiken folgende wichtige Verteilungsfunktionen an:<sup>165</sup>

- Binomialverteilung (zur Modellierung der Eintrittswahrscheinlichkeit)
- Poissonverteilung
- Normalverteilung
- Log-Normalverteilung
- Dreiecksverteilung
- Exponentialverteilung
- Pareto-Verteilung
- Rechteckverteilung

#### 5.9.23 Sander

Sander führt in seiner Dissertation ebenfalls die Bedeutung der Wahl von Verteilungsfunktionen bei der Risikobewertung an. Gängige theoretische Verteilungen haben das Problem, dass die Parameter, die für die Definition der Verteilung erforderlich sind, meist nicht von ExpertInnen eingeschätzt werden können. Vorteile werden bei Verteilungen gesehen, die durch 3-Punkt-Schätzungen definiert werden können (Dreiecks- und PERT-Verteilungen). Rechteckverteilungen haben lt. Sander den Nachteil, dass bei der Modellierung von ExpertInnenmeinungen ein schlagartiger Abfall der Verteilung an den Randwerten auf null nicht den Vorstellungen entspricht.<sup>166</sup>

<sup>163</sup> Vgl. Hauwermeiren/Vose (2009). A Compendium on Distributions. S. 12f (Online unter: <http://www.vosesoftware.com/content/ebook.pdf>. Datum des Zugriffs: 21.01.2015)

<sup>164</sup> Vgl. Hauwermeiren/Vose (2009). A Compendium on Distributions. S. 15 (Online unter: <http://www.vosesoftware.com/content/ebook.pdf>. Datum des Zugriffs: 21.01.2015)

<sup>165</sup> Vgl. Gleißner (2011). Grundlagen des Risikomanagements im Unternehmen – Controlling, Unternehmensstrategie und wertorientiertes Management. S. 117ff

<sup>166</sup> Vgl. Sander (2012). Probabilistische Risiko-Analyse für Bauprojekte. S. 93ff

Dreiecksverteilungen und PERT-Verteilungen sind leicht zu definieren und die drei erforderlichen Werte (Minimum, erwarteter Wert und Maximum) sind von ExpertInnen in jedem Fall einfacher einzuschätzen als komplizierte Formparameter oder Standardabweichungen. Aus der Erfahrung gibt Sander an, dass durch subjektive Einschätzung bei Risiken ohne ausreichende statistische Daten, die Entscheidung zwischen Dreiecks- und PERT-Verteilungen in den meisten Fällen nicht sinnvoll belegt werden kann.<sup>167</sup>

Die in verschiedenen Fachbereichen häufig angesetzten Normalverteilungen haben lt. Sander den großen Nachteil, dass keine Schiefe dargestellt werden kann. Für Kostenunsicherheiten werden allerdings eher rechtsschiefe Verteilungen erwartet. Weiters sind die Ränder der Normalverteilung nicht begrenzt, was viele Vorgänge nicht adäquat abbildet. Sander verwendet anstelle von Normalverteilungen in seinem Berechnungsprogramm geschlossene PERT-Verteilungen.<sup>168</sup>

#### 5.9.24 Mayer

Mayer gibt in seiner Dissertation aufgrund der Analyse empirischer Daten Normalverteilungen mit entsprechenden Standardabweichungen für Basis-einheitspreise an.<sup>169</sup> Weiters werden für die Modellierung von Mengenabweichungen Normalverteilungen erwartet und aufgrund von theoretischen Überlegungen Standardabweichungen (zwischen 0 % und 20 %) für unterschiedliche Arbeiten angeführt.<sup>170</sup>

#### 5.9.25 Hofstadler

Hofstadler wies anhand von ExpertInnenbefragungen für Aufwandswerte von Schalungsarbeiten bei Flachdecken mittels Fitting eine LogLogistic-Verteilung als jene theoretische Verteilung nach, die die ExpertInnenmeinungen bestmöglich wiedergibt. Diese theoretische Verteilung wurde durch eine polygonale Annäherung in eine beidseitig geschlossene LogLogistic-ähnliche Verteilung übergeführt.<sup>171</sup>

Weiters wurden Methoden gezeigt, wie durch Angabe eines minimalen und eines Erwartungswerts<sup>172</sup> bzw. eines minimalen und erwarteten Werts<sup>173</sup> die polygonal angenäherte LogLogistic-ähnliche Verteilung individuell und benutzerspezifisch angepasst werden kann. Der/die AnwenderIn übernimmt nur die aus der ExpertInnenbefragung erhobene Form der Verteilung, passt die absoluten Werte jedoch an seine individuellen Einschätzungen an. Das Ergebnis dieses Vorgangs ist eine LogLogistic-ähnliche Verteilung, die die ExpertInnenmeinung von 19 Befragten mit Einschätzungen des/der Anwenders/Anwenderin vereint.

<sup>167</sup> Vgl. Sander (2012). Probabilistische Risiko-Analyse für Bauprojekte. S. 97ff

<sup>168</sup> Vgl. Sander (2012). Probabilistische Risiko-Analyse für Bauprojekte. S. 101f

<sup>169</sup> Vgl. Mayer (2013). Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung – Entwicklung eines Kosten-Prognose-Modells für Bauwerkskosten im Hochbau. S. 145ff

<sup>170</sup> Vgl. Mayer (2013). Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung – Entwicklung eines Kosten-Prognose-Modells für Bauwerkskosten im Hochbau. S. 151ff

<sup>171</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Monte-Carlo-Simulation im Baubetrieb – Verteilungsfunktion für Aufwandswerte bei Schalarbeiten. S. 189ff

<sup>172</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Monte-Carlo-Simulation im Baubetrieb – Verteilungsfunktion für Aufwandswerte bei Schalarbeiten. S. 189ff

<sup>173</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2015). Unveröffentlichtes Arbeitspapier.

### 5.9.26 Schach/Flemming

Da die Datengrundlage für die Ermittlung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen meist nicht vorhanden ist, empfehlen Schach/Flemming einfache Verteilungen auf Erfahrungswissen für die Modellierung von Risiken anzugeben. Beispielhaft werden folgende Verteilungen angeführt:<sup>174</sup>

- Rechteckverteilung
- Dreiecksverteilung
- Trapezverteilung
- Diskrete Verteilungen (gleichverteilt, exponentieller oder beliebiger Verlauf)

Spezielle Verteilungen sollten nur dann gewählt werden, wenn sie statistisch nachgewiesen (anhand von vorhandenen Daten) oder aus theoretischen Überlegungen eindeutig ableitbar sind.<sup>175</sup>

### 5.9.27 Zusammenfassung der Literaturansätze für Verteilungsfunktionen

Die ausgewählten Literaturansätze für Verteilungsfunktionen unterschiedlicher Parameter werden in den nachfolgenden Tabellen (Tab. 5-9 bis Tab. 5-11) vergleichend gegenübergestellt. Unterscheidungskriterien sind:

- Verlauf
  - diskret
  - stetig
- Ausbildung der Grenzen
  - geschlossen
  - einseitig offen
  - beidseitig offen
- Schiefe
  - symmetrisch
  - rechtsschief
  - linksschief
- Modus
  - unimodal
  - multimodal
- Erhebungsmethode
  - theoretische Überlegungen
  - historische bzw. erhobene Daten
  - Befragungen

Auffällig ist die häufige Angabe von stetigen, geschlossenen, unimodalen Verteilungen. Sehr oft wird auch angegeben, dass rechtsschiefe Verteilungen anzusetzen sind.

<sup>174</sup> Vgl. Schach/Flemming (2014). Grundlagen der Kostensimulation unter Einbeziehung von Risiken. S. 254f

<sup>175</sup> Vgl. Schach/Flemming (2014). Grundlagen der Kostensimulation unter Einbeziehung von Risiken. S. 255



Diskrete Verteilungen werden nur in seltenen Fällen angewendet; multimodale und linksschiefe Verteilungen werden in den zitierten Literaturquellen nicht angeführt.

In der Mehrheit der Literaturangaben wird nur aufgrund von theoretischen Überlegungen auf die Form der Verteilungen geschlossen. Nur in seltenen Fällen erfolgt eine Erhebung über historisches Datenmaterial oder aufgrund von Befragungsergebnissen. Erfolgt die Ermittlung über diese beiden Möglichkeiten, werden auch häufig theoretische Überlegungen miteinbezogen.

Lfd. Nr.	Autor	Parameter	Verlauf		Grenzen		Schiefe		Modus		Erhebungsmethode		konkrete Verteilung		
			c diskret	d stetig	m geschlossen	f einseitig offen	e beidseitig offen	h symmetrisch	i rechtsschief	j linksschief	k unimodal	l multimodal		m theoretische Überlegungen	n historische bzw. vorhandene Daten
0	A	B											P		
1	Hruschka (1968)	Aufwandswert - Frischbeton herstellen		X								X		k.A.	
2		Aufwandswert - Bewehren		X					X	X			X	k.A.	
3	Schubert (1971)	Risiko des Arbeitsausfalls infolge Witterung		X	X			X	X		X	X		Gammaverteilung	
4		Risiko eines geringeren Leistungsergebnisses als erwartet		X	X			X	X		X			Gammaverteilung	
5		Schadenshöhe		X	X			X	X				X	Exponentialverteilung	
6		Risiko aus Änderung der Leistungsumfangs		X	X			X	X		X		X	Poissonverteilung	
7		Preisrisiko		X	X			X	X		X			Gammaverteilung	
8		Risiko aus Verzögerungen und Behinderungen des Bauablaufs		X	X			X	X		X			Exponentialverteilung	
9				X		X		X	X		X			Poissonverteilung	
10				X		X		X	X		X			Poissonverteilung	
11	Golenko (1972)	Vorgangsdauern		X	X					X		X	X	Beta-Verteilung	
12				X	X							X		Rechteckverteilung	
13				X	X			X	X		X			Logarithmische Normalverteilung	
14				X	X				X	X		X		Dreiecksverteilung	
15	Dinort (1977)	Niederschlagsverteilung		X	X			X	X			X	Logarithmische Normalverteilung		
16		Anzahl der Frost- und Eistage		X	X			X	X			X	Binomialverteilung (p = 0,1)		
17				X	X			X	X			X	Poissonverteilung		
18		Ausfallzeiten		X	X			X	X			X		Chi-Quadrat-Verteilung	
19				X	X			X	X		X	X		Gammaverteilung	
20				X	X				X	X		X	X	Gamma-Erlang-Verteilung	
21			X	X			X	X		X	X		Chi-Quadrat-Verteilung		
22	Schulz (1980)	Kalkulationsansätze		X		sind zu beachten			X			X	Normalverteilung		
23	Lederer (1982)	Vorgangsdauern		X	X			X	X		X		k.A.		
24	Strehl (1983)	Aufwandswerte - Schalen (Stützen, Wände, Decken)		X	X			X	X			X		Gammaverteilung	
25		Aufwandswerte - Betonieren (Stützen, Wände, Decken)		X	X			X	X			X		Gammaverteilung	
26	Liberda (1985)	Aufwandswerte		X	X			X	X			X		Gammaverteilung	
27		Bruttomittellohn		X		X	X		X	X		X		Normalverteilung	
28	Iwan (1992)	Vorgangsdauern		X	X			X	X		X			Exponentialverteilung	
29				X	X					X		X		Rechteckverteilung	
30				X	X	X	X		X	X		X		Normalverteilung	
31		Ausfallzeiten		X	X			X	X		X			Erlangverteilung	
32			Zwischenausfallzeiten		X	X			X	X		X	X		Exponentialverteilung
33	Chau (1995)	Baukosten		X	X			X	X		X		X	Erlangverteilung	
34					X	X			X	X		X		X	k.A.
35	Raftery (1999)	Verteilungen die in der Risikoanalyse angewendet werden		X	X						X			LogTriangular-Verteilung	
36				X	X					X		X		Rechteckverteilung	
37				X	X					X	X			Dreiecksverteilung	
38				X	X							X			Trapezverteilung
39				X	X							X			Stufenweise Rechteckverteilung
40			X	X							X			Diskrete Verteilung	

Tab. 5-9 Auswertung ausgewählter Literaturansätze für Verteilungsfunktionen unterschiedlicher Parameter – Teil 1

Lfd. Nr.	Autor	Parameter	Verlauf		Grenzen			Schiefe			Modus		Erhebungsmethode			konkrete Verteilung	
			diskret	stetig	geschlossen	einseitig	beidseitig	symmetrisch	rechtschief	linkschief	unimodal	multimodal	theoretische Überlegungen	historische bzw. erhobene Daten	Befragung		
0	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
41	Link (1999)	Lebensdauer von Werkstücken		X	X				X		X	X				Exponentialverteilung	
42		Inflationsrate		X			X	X			X	X				Normalverteilung	
43		Preisentwicklung von Treibstoffen		X			X	X				X	X			Normalverteilung	
44		Treibstoffverbrauch		X	X							X	X			Dreiecksverteilung	
45		Verkaufszahlen von Baustoffen pro Woche		X	X							X	X			Dreiecksverteilung	
46		Fehlerhafte Ziegel in der Produktion		X		X			X			X	X			Binomialverteilung	
47		Telefonanrufe pro Minute / Anzahl Schreibfehler auf einer Seite		X			X			X		X	X			Poissonverteilung	
48		Anzahl der Leerböhrungen (Olisuche)		X			X			X		X	X			Geometrische Verteilung	
49		Anzahl defekter Waren in einer Packung		X		X						X	X			Hypergeometrische Verteilung	
50	Werner (2002)	Zeitaufwandswerte und Kosten		X	X		X				X	X	X			PERT-Verteilung	
51				X			X	X				X	X	X		Normalverteilung	
52				X	X								X	X			Rechteckverteilung
53	Raaber (2003)	Mengen- und Kostenansätze		X	X						X	X				Rechteckverteilung	
54				X			zu beachten					X	X			Normalverteilung	
55				X	X								X	X			Dreiecksverteilung
56		X	X								X	X				Parabolische Verteilung (nicht näher definiert)	
57	Rohr (2005)	Vorgangsdauern		X	X				X		X	X	X	X		Beta-Verteilung	
58				X	X				X		X	X	X	X		Dreiparametrische Gammaverteilung	
59				X	X					X		X	X	X			Dreiparametrische inverse Gauß-Verteilung
60				X	X					X		X	X	X			Dreiparametrische logarithmische Normalverteilung
61				X	X					X		X	X	X			Dreiparametrische Weibull-Verteilung
62	Schach (2005)	Kostenansätze		X	X							X	X	X		Rechteckverteilung	
63				X	X				X		X	X	X	X		Dreiecksverteilung	
64				X	X					X		X	X	X	X		Beta-Verteilung
65				X	X					X		X	X	X	X		PERT-Verteilung
66	Feik (2006)	Einzelrisiken		X	X						X	X				Dreiecksverteilung	
67	Girmscheid/Motzko (2007)	Schadenshöhe		X	X				X		X	X				PERT-Verteilung	
68	Girmscheid/Busch (2008)	Eintretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses - Grobmodellierung		X	X						X	X				Beta-Verteilung	
69		Vorgangsdauern und Expertenmeinungen		X	X						X	X				PERT-Verteilung	
70		Finanztheorie - Gewinn und Cashflow		X			X	X				X	X			Normalverteilung	
71		Expertenmeinungen		X	X							X	X			Dreiecksverteilung	
72		Lebensdauer von Maschinen mit konstanter Versagenswahrscheinlichkeit		X		X				X		X	X			Exponentialverteilung	
73		Grobmodellierung von Risiken		X	X								X			Rechteckverteilung	
74		Ausfallwahrscheinlichkeit		X		X						X	X			Binomialverteilung	
75		Risikoeintritt		X		X							X			Diskrete Verteilung	
76	Ausfallwahrscheinlichkeit		X			X			X		X	X			Poissonverteilung		
77	Demmler (2009)	Tunnelbau - Bruttovortriebsleistung		X	X							X	X			Rechteckverteilung	
78		Ausfallzeiten		X	X						X	X	X			Dreiecksverteilung	
79	Hauwermeiren/Vose (2009)	Risikokosten		X	X				X		X	X				Exponentialverteilung	
80				X	X				X		X	X					LogGamma-Verteilung
81				X	X					X		X	X				LogLogistic-Verteilung
82				X	X					X		X	X				Logarithmische Normalverteilung
83			X	X					X		X	X				Pareto-Verteilung	
84			X	X								X				Bernoulli-Verteilung	
85			X	X								X				Diskrete Verteilung	
86			X	X								X	X			PERT-Verteilung	
87		X	X								X	X			Dreiecksverteilung		
88		X	X									X			Rechteckverteilung		

Tab. 5-10 Auswertung ausgewählter Literaturansätze für Verteilungsfunktionen unterschiedlicher Parameter – Teil 2

Lfd. Nr.	Autor	Parameter	Verlauf		Grenzen		Schiefe			Modus		Erhebungsmethode			konkrete Verteilung	
			c diskret	d stetig	e geschlossen	f einseitig offen	g beidseitig offen	h symmetrisch	i rechtsschief	j linksschief	k unimodal	l multimodal	m theoretische Überlegungen	n historische bzw. erhobene Daten		o Befragung
0	A	B	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	P
89	Gleißner (2011)	Eintrittswahrscheinlichkeit	X	X									X			Binomialverteilung
90		Anzahl der Schadensereignisse	X			X			X		X		X			Poissonverteilung
91		Schadenshöhe		X			X	X				X	X			Normalverteilung
92		Einkommen und Produktpreise		X	X				X		X		X			Logarithmische Normalverteilung
93		Quantitative Risikoeinschätzung durch Anwender		X	X							X	X			Dreiecksverteilung
94		Lebensdauer von Geräten		X		X			X		X		X			Exponentialverteilung
95		Finanzmarktrenditen		X		X			X		X		X	X		Pareto-Verteilung
96	Modellierung von Variablen über die wenig Informationen vorliegen			X	X								X		Rechteckverteilung	
97	Sander (2012)	Expertenmeinungen		X	X						X	X				Dreiecksverteilung
98				X	X							X	X			PERT-Verteilung
99		Mengen- und Kostenunsicherheiten		X	X				X		X	X				Dreiecksverteilung
100				X	X				X		X	X				PERT-Verteilung
101			X	X								X			Rechteckverteilung	
102	Mayer (2013)	Basiseinheitenpreise		X		X	X			X	X					Normalverteilung
103		Mengenwerte		X		X	X			X	X		X			Normalverteilung
104	Hofstadler (2014)	Aufwandswerte - Schalarbeiten		X	X				X		X				X	LogLogistic-ähnliche Verteilung
105	Schach/ Flemming (2014)	Risikomodellierung		X	X							X	X			Rechteckverteilung
106				X	X						X	X				Dreiecksverteilung
107				X	X								X			Trapezverteilung
108				X	X									X		

Tab. 5-11 Auswertung ausgewählter Literaturansätze für Verteilungsfunktionen unterschiedlicher Parameter – Teil 3

Aus der gezeigten Literaturanalyse kann die Tendenz zu stetigen, geschlossenen, rechtsschiefen, unimodalen Verteilungen abgeleitet werden. Diese Angaben werden in der Literatur meist durch theoretische Überlegungen – verifiziert durch historische Daten und Analyse von Befragungen – begründet.

Nachdem auf den Einfluss und auf ausgewählte Literaturansätze für Verteilungsfunktionen im Baubetrieb und der Bauwirtschaft eingegangen wurde, wird im nächsten Abschnitt gezeigt, wie eine systematische Auswahl von Verteilungsfunktionen für die Modellierung von Inputparametern durchgeführt werden kann und wie Verteilungsfunktionen anhand von Datensätzen ermittelt werden können.

## 5.10 Wahl von Verteilungsfunktionen

Für die Durchführung von probabilistischen Berechnungen ist es erforderlich, die Eingangsparameter mit Verteilungsfunktionen zu belegen. Die Wahl der „richtigen“ Verteilung stellt die Anwender immer wieder vor das Problem, welche der zahlreich zur Verfügung stehenden theoretischen Verteilungen die Eigenschaften eines Parameters bestmöglich widerspiegeln. Ist die Entscheidung für eine Verteilungsfunktion getroffen, müssen die entsprechenden Formparameter definiert werden, um eine Monte-Carlo-Simulation letztendlich durchführen zu können.

Die Wahl von Verteilungsfunktionen ist grundsätzlich auf Basis von drei Methoden und deren Kombination möglich (siehe Abb. 5-35):

- Theoretische Überlegungen und Charakteristika
- Datenerhebung aus der Praxis
- ExpertInnenbefragungen

Für nicht abzählbare Parameter unterscheidet sich die Wahl von Verteilungsfunktionen grundlegend von jenen, bei denen die Wahrscheinlichkeit berechnet werden kann. Die Eintrittswahrscheinlichkeit der Augenzahl eines Würfels kann aufgrund einer begrenzten Anzahl an Möglichkeiten und aufgrund der Tatsache, dass das Auftreten jeder Augenzahl gleich wahrscheinlich ist, rechnerisch ermittelt werden. Leistungs- und Aufwandswerte sind theoretisch nach oben und unten begrenzt, wenn man davon ausgeht, dass ein Bauwerk auch tatsächlich ausgeführt und fertiggestellt wird. Aber nicht jeder der Werte innerhalb dieser Bandbreite wird gleich wahrscheinlich sein. Zusätzlich enthält die Wahl von Verteilungsfunktionen, zur Beschreibung zukünftiger Ereignisse, immer auch eine subjektive Komponente, die die Form der Verteilung beeinflusst und verändert. Dieser rein subjektive Zugang kann durch Einbeziehung historischer Daten oder Einschätzungen von ExpertInnen (damit erreicht man zwar keine „Objektivität“, jedoch zumindest „Intersubjektivität“) verringert werden.

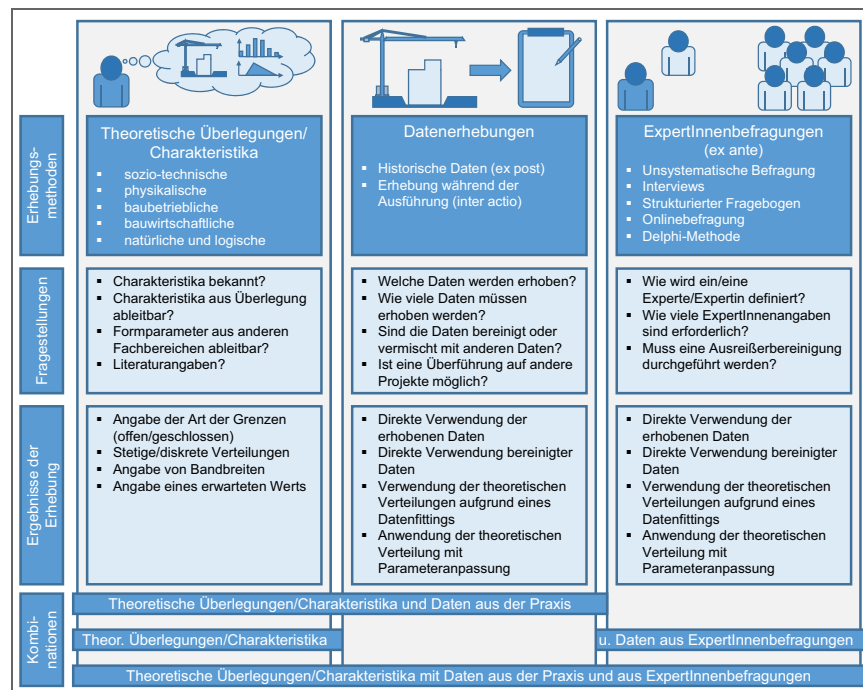


Abb. 5-35 Arten der Erhebung von Verteilungsfunktionen

Liegen keine oder nur unzureichende Nachkalkulationen und damit keine ausreichende Datenbasis vor, können in der Regel von entsprechend erfahrenen MitarbeiterInnen Wertangaben innerhalb einer praktikablen Bandbreite angegeben bzw. abgeschätzt werden.

In den folgenden Abschnitten wird näher auf die Erhebungsmethoden und die Generierung von Verteilungsfunktionen eingegangen.

### 5.10.1 Theoretische Überlegungen und Charakteristika

Zunächst können grundsätzliche theoretische Überlegungen und Charakteristika meist aufgrund von sozio-technischen, physikalischen, baubetrieblichen, bauwirtschaftlichen, natürlichen oder logischen Eigenschaften des Eingangsparameters bestimmt werden.

Es ist beispielsweise nicht sinnvoll, mit negativen Preisen oder einer unendlichen Anzahl an Kranen zu rechnen. Meist können bestimmte Parameter in baubetrieblich realistischen Bandbreiten angegeben werden. Es macht daher für Inputgrößen im Baubetrieb und in der Bauwirtschaft wenig Sinn, einseitig oder gar beidseitig offene Verteilungen als Inputs zu wählen, da damit auch Werte bis minus und plus unendlich zugelassen werden würden.

Für die Wahl der Verteilungsfunktionen gelten hier folgende Randbedingungen:

- Das Bauwerk wird tatsächlich gebaut.
- Das Bauwerk wird tatsächlich fertiggestellt.

Es sollte auch das Ziel sein, unsinnige oder unmögliche Ergebnisse von vornherein auszuschließen, um einerseits eine möglichst gute Entscheidungsgrundlage zu schaffen, andererseits in Hinblick auf Optimierungsverfahren im Sinne des Operations Research Rechenkapazitäten ideal zu nutzen.

Zudem muss je nach Fragestellung und Inputgröße untersucht werden, ob die Umstände und Rahmenbedingungen besser durch diskrete oder stetige Verteilungen abgebildet werden können. Wird eine Eingabe durch eine einfache Eins-Null-Beziehung (ja/nein bzw. wahr/falsch) definiert, ist eine diskrete Verteilung (genauer eine Bernoulli-Verteilung) anzusetzen. Sind für eine Größe nur bestimmte Werte möglich, ist ebenfalls eine diskrete Verteilung anzusetzen (z.B. die konkrete Anzahl der Krane in einer bestimmten Bauphase). Kann ein Parameter beliebige Dezimalzahlen annehmen, ist eine stetige Verteilung zu wählen (z.B. für Aufwandswerte, vereinfacht auch für Kosten und Preise). Für die Berechnung von durchschnittlichen Größen, wie etwa der mittleren Anzahl an Arbeitskräften, können durchaus stetige Verteilungen den diskreten vorgezogen werden, da zwar die tatsächlich eingesetzte Anzahl an Arbeitskräften natürlich nur ganzzahlige Werte, die mittlere Anzahl jedoch auch Dezimalwerte annehmen kann.

Wird einem oder mehreren Werten eines Parameters eine höhere Eintrittswahrscheinlichkeit zugewiesen, wird die Verteilung entsprechend einen unimodalen oder multimodalen Verlauf<sup>176</sup> aufweisen.

Weitere Überlegungen hinsichtlich der möglichen Form und der Charakteristika der parameterabhängigen Verteilungsfunktionen sind eventuell auch aus anderen Fachbereichen oder aus Literaturangaben ableitbar.

Abb. 5-36 zeigt mögliche Kriterien, nach denen die Form von Verteilungen stufenweise ausgewählt werden kann. Zudem sind in der Abbildung qualitative grafische Beispiele für die jeweiligen Verteilungsformen angeführt. Zunächst gilt es zwischen deterministischen und probabilistischen Inputs zu

<sup>176</sup> In der betrachteten Literatur finden sich keine Beispiele für multimodale Inputparameter – siehe auch Tab. 5-9 bis Tab. 5-11.

unterscheiden. Wird ein deterministischer Input vorausgesetzt, erfolgt die Eingabe durch eine einzelne Zahl und nicht durch Verteilungsfunktionen. Im Zuge von Monte-Carlo-Simulationen können durchaus deterministische und probabilistische Eingabeparameter kombiniert werden. Werte, die mit Sicherheit bekannt sind, müssen nicht „künstlich“ mit Verteilungen belegt werden.

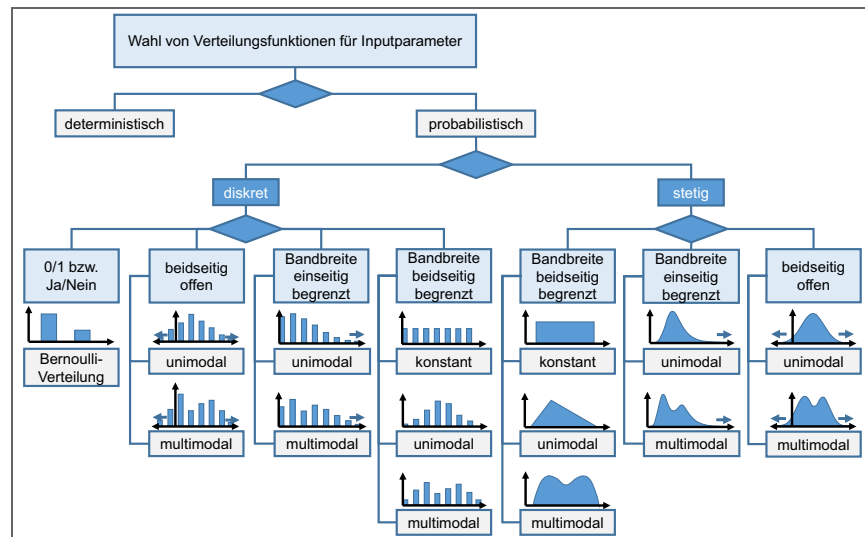


Abb. 5-36 Qualitative Darstellung möglicher Ausprägungen von Verteilungsfunktionen – Entscheidungsstruktur

Liegt ein Parameter mit stochastischem Verhalten vor, muss zunächst unterschieden werden, ob für den probabilistischen Input eine diskrete oder eine stetige Verteilung zu wählen ist. Weiters wird die Art der Grenzen (beidseitig offen, einseitig offen oder beidseitig begrenzt) unterschieden. In einem letzten Schritt erfolgt die Auswahl der Merkmalsausprägungen innerhalb der gewählten Bandbreite. Bei beidseitig begrenzten (geschlossenen) Verteilungen ist auch ein konstanter Verlauf innerhalb der angegebenen Bandbreite möglich. Bei allen anderen Verteilungen ist entweder ein uni- oder multimodaler Verlauf zu erwarten. Eine Sonderstellung nimmt die Bernoulli-Verteilung innerhalb der diskreten Verteilungen ein. Sie lässt nur zwei Merkmalsausprägungen (0 und 1) zu und ist damit für ja/nein- bzw. wahr/falsch-Eingaben geeignet (z.B. Eintrittswahrscheinlichkeit von Risiken).

Zusätzlich gilt es bei den beidseitig offenen und den beidseitig geschlossenen (nicht konstanten) Verteilungen noch zwischen symmetrischen und asymmetrischen (schiefen) Verteilungen zu unterscheiden (in Abb. 5-36 nicht dargestellt).

Weiterführend sei an dieser Stelle auf Vose<sup>177</sup> verwiesen. Hier ist im Anhang eine gute Übersicht über unterschiedliche Verteilungsfunktionen angeführt.

### 5.10.2 Datenerhebung aus der Praxis

Die zweite Möglichkeit zu Verteilungsfunktionen zu gelangen ist die direkte Erhebung von Daten aus der Praxis. Hier wird zusätzlich in historische Daten

<sup>177</sup> Vgl. Vose (2008), Risk Analysis – A quantitative guide.

(ex post – also nach der Ausführung) und Daten, die während der Bauausführung (inter actio) erhoben werden, unterschieden.

Bei der Datenerhebung, die während der Bauausführung laufend durchgeführt wird, ist auf die Abgrenzung (räumlich, zeitlich, inhaltlich etc.) und die Qualität der erhobenen Daten besonderer Wert zu legen. Außerdem ist zu untersuchen, ob die erhobenen Werte vor einer weiteren Verwendung bereinigt werden müssen, oder ob diese direkt übernommen werden können. Für die Qualität erhobener Daten ist auch die Anzahl der Datenpunkte entscheidend. Je geringer die Stichprobe und je größer die Standardabweichung der erhobenen Daten, desto ungenauer ist die darauf basierende Schätzung für die Parameter der Grundgesamtheit.

AbouRizk/Halpin geben an, dass die Kategorisierung von Verteilungen mit weniger als 20 Beobachtungen<sup>178</sup> nicht möglich ist.<sup>179</sup>

### 5.10.2.1 Verteilungen aus historischen Daten (ex post)

Liegen historische Daten aus vergangenen Projekten vor, so kann im Rahmen der schließenden Statistik (Inferenzstatistik) mit Signifikanztests auf theoretische Verteilungen der Grundgesamtheit geschlossen werden. Dabei ist zu untersuchen, ob die vergangenen Leistungen mit einem aktuellen Projekt überhaupt vergleichbar und die ermittelten Verteilungen anwendbar sind.

„Es muß Ziel von betrieblichen Untersuchungen sein, die Verteilung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der verschiedenen möglichen Werte zu gewinnen.“<sup>180</sup>

Zu beachten ist, dass es sich bei Daten, die aus der Praxis erhoben werden, immer nur um eine Stichprobe handelt. Es stellt sich damit die Frage, ob die gewählte Stichprobe eine Zufallsstichprobe ist und somit überhaupt auf die Grundgesamtheit geschlossen werden kann.

Die Methoden der schließenden Statistik dürfen streng genommen nur für Zufallsstichproben angewandt werden. Mögliche Formen der Stichprobenerhebung sind:<sup>181</sup>

- zufällige Auswahl (Wahrscheinlichkeitsauswahl)
- bewusste Auswahl (z.B. Quotenstichprobe)
- willkürliche Auswahl (z.B. nach dem Schneeballprinzip<sup>182</sup>)

Auch wenn die formalen Anforderungen an eine Zufallsstichprobe nicht erfüllt werden können, kann doch aus den gewonnenen Daten zumindest eine Verteilungsform ermittelt und für weitere Überlegungen herangezogen werden. Die direkte Verwendung der Verteilungen ist als kritisch zu erachten, da sich die historischen Daten auf Projekte und Umstände beziehen, die mit einem aktuellen Untersuchungsgegenstand (aktuelles Bauprojekt) meist nicht unmittelbar verglichen werden können. In einem solchen Fall die historischen Daten direkt anzusetzen, kann zu falschen Ergebnissen führen.

<sup>178</sup> Der Begriff „Beobachtungen“ wird dabei im Sinne von „Zeitmessungen“ verwendet.

<sup>179</sup> Vgl. AbouRizk/Halpin (1992). Statistical Properties of Construction Duration Data. S. 538

<sup>180</sup> Dinort (1977). Berücksichtigung stochastischer Einflüsse in der Kostenrechnung einer Bauunternehmung. S. 16

<sup>181</sup> Vgl. Diekmann (2007). Empirische Sozialforschung – Grundlagen, Methoden, Anwendungen. S. 378

<sup>182</sup> Verbreitungsart einer Nachricht o. Ä., bei der jede Person die erhaltene Information an mehrere Personen weiterverbreitet.

Werden die Formparameter der ermittelten Verteilungsfunktionen allerdings fachkundig an die gegebenen Umstände angepasst, ist eine deutliche Ergebnisverbesserung zu erwarten.

Durch Fittings wird jene theoretische Verteilung ermittelt, die die erhobenen Daten bestmöglich (mit dem geringsten Fehler) repräsentiert.

Vor einem Fitting sind die historischen Daten auf ihre Reinheit und Verwendbarkeit hin zu untersuchen. Sind die Randbedingungen und Umstände, unter denen die Daten erhoben wurden, nicht mehr bekannt, sollten diese nicht unreflektiert übernommen werden.

Die direkte Verwendung von Werten aus Nachkalkulationen für eine Angebotskalkulation ist nur bedingt möglich, da es im Zuge der Bauausführung zu Leistungsänderungen, Behinderungen, Produktivitätsverlusten etc. gekommen sein kann. Die historischen Daten müssten vor ihrer Verwendung von solchen Einflüssen bereinigt werden, was mit einem erhöhten Aufwand in der Datenaufbereitung verbunden ist.

Song/AbouRizk geben an, dass historische Daten fehlerfrei („accurate“), widerspruchsfrei („consistent“) und umfassend („comprehensive“) sein müssen, um einen Nutzen aus diesen Daten in Kombination mit einem Berechnungsmodell zu ziehen. Es werden folgende Probleme in Zusammenhang mit historischen Daten angegeben:<sup>183</sup>

- Viele Unternehmen haben keinen formalen Prozess für die Erhebung des Projektfortschritts und des Aufwands in ihrer Organisation integriert. Historische Daten liegen also oft einfach nicht vor.
- Die Datenerhebungen variieren über unterschiedliche Projekte, d.h. es liegt kein einheitlicher Datenpool vor.
- Wenn Daten in papierbasierten Systemen gesammelt werden, ist die zeitaufwändige manuelle Datengewinnung mit einer hohen Ressourcenintensität verbunden.
- In Unternehmen werden oft nur globale Daten systematisch erhoben. Für Produktivitätsmessungen und Vorhersagen müssen die Daten aber auch auf einer detaillierten Ebene erfasst und analysiert werden.

Hutzelmeyer zeigt ebenfalls die Gefahr ungeeigneter Vergleichsdaten auf:

„Bei Übertragung von Kostendaten aus laufenden oder durchgeführten Projekten auf ein neues Projekt muß darauf geachtet werden, daß Vergleichbarkeit auf folgenden Gebieten vorhanden ist oder hergestellt werden kann:

- technische Ähnlichkeiten oder Konstruktion
- gleichwertige Qualität
- regionale Baumarktlage

Die kritiklose Übernahme von Mittelwerten oder Richtwerten führt eventuell zu völlig falschen Ergebnissen.“<sup>184</sup>

<sup>183</sup> Vgl. Song/AbouRizk (2008). Measuring and Modeling Labor Productivity Using Historical Data. S. 788

<sup>184</sup> Hutzelmeyer (1984). Die Kostensteuerung des Bauauftraggebers. S. 70



Zukünftig wäre eine verbesserte Datenbasis anhand von BIM-Modellen<sup>185</sup> denkbar, wobei hier zu beachtende Aspekte der Datenfilterung vermutlich neue Herausforderungen mit sich bringen.

### 5.10.2.2 Datenerhebung während der Ausführung (inter actio)

Die Datenerhebung (z.B. von Leistungs- oder Aufwandswerten) während der Bauausführung kann eine solide Basis für die Prognostizierung von Fertigstellungsterminen und zu erwartenden Einzelkosten liefern und ist für Soll-Ist-Vergleiche einsetzbar.

Auch für die Darstellung von Leistungsänderungen oder unerwarteten/geänderten Umständen der Leistungserbringung bzw. in weiterer Folge für Vergleiche mit den getroffenen Kalkulationsannahmen kann eine Datenerhebung während der Ausführung sinnvoll sein. Für die Argumentation von Nachtragsforderungen (AN) und für die Nachtragsabwehr (AG) können die erhobenen Daten der Angebotskalkulation gegenübergestellt und anhand von probabilistischen Berechnungen bzgl. der Risiken und Chancen verglichen werden.

Bei der Datenerhebung muss systematisch vorgegangen und eine ausreichende Datenmenge erhoben werden. Auch bei der Erhebung während der Bauausführung können die Aufzeichnungen mit äußeren oder inneren Einflüssen vermischt sein. Beispielhaft seien hier der Einarbeitungseffekt, Störungen im Bauablauf und ungünstige Witterungsbedingungen genannt. Werden etwa Aufwandswerte im Sommer erhoben und es soll damit eine Prognose für Arbeiten in den Wintermonaten erstellt werden, ist eine Abgrenzung und Bereinigung der erhobenen Daten durchzuführen.

Bei Untersuchungen an der TU Graz hat sich gezeigt, dass die REFA-Systematik eine effektive, nachvollziehbare und relativ einfach durchzuführende Methode darstellt, um Daten während der Bauausführung zu erheben. Es wurden dabei Multimomentaufnahmen durchgeführt, bei denen einzelne Tätigkeiten getrennt erhoben wurden. Es können Haupt- und Nebentätigkeiten sowie zusätzliche Tätigkeiten und ablaufbedingte, störungsbedingte, erholungsbedingte sowie persönlich bedingte Unterbrechungen unterschieden werden. Eine Abgrenzung der Tätigkeiten ist damit möglich. Allerdings sind diese Aufzeichnungen, wenn sie systematisch durchgeführt werden, sehr zeit- und arbeitsintensiv.

Durch die Erhebung der Mannschaftsstärke, der Arbeitszeit und der geleisteten Arbeit (z.B. Menge an verlegter Bewehrung) können Aufwandswerte für die tatsächliche Ausführung ermittelt werden.

Auch bei der Datenerhebung während der Ausführung kann nur in Ausnahmefällen die damit erhobene theoretische Verteilung direkt für weitere Berechnungen herangezogen werden. Die Anwendung der parameterspezifischen Verteilungsfunktion, modifiziert um individuell definierte Formparameter (z.B. Minimum und erwarteter Wert), führt aber in jedem Fall zu einer Ergebnisverbesserung.

Ein Beispiel für die Integration von erhobenen Ausführungsdaten in ein Simulationsmodell findet sich z.B. bei Xie/AbouRizk/Fernando.<sup>186</sup> Hier

<sup>185</sup> BIM = Building Information Modeling

<sup>186</sup> Vgl. Xie/AbouRizk/Fernando (2011). Integrating Realtime Project Progress Input into a Construction Simulation Model. S. 3457f.

werden Vortriebsleistungen einer Tunnelbohrmaschine erhoben und ein Datenfitting durchgeführt, um mit den erhobenen Verteilungsfunktionen weitere Berechnungen durchführen und Prognosen abgeben zu können. Je mehr Daten vorhanden sind, desto stabiler werden die Datenfittings.

### 5.10.3 ExpertInnenbefragungen (ex ante)

ExpertInnenbefragungen können prinzipiell schriftlich und/oder mündlich durchgeführt werden. Bei den mündlichen Befragungen wird in persönliche und telefonische Befragungen unterschieden.

In der empirischen Sozialforschung wird oft zwischen einem qualitativen und einem quantitativen Ansatz unterschieden. Erstere Vorgehensweise zeichnet sich durch Offenheit in der Befragung aus, während zweiterer Forschungsansatz einen hohen Standardisierungsgrad aufweist (z.B. Erhebung mittels Fragebogen).

Ist nur mit einer geringen Anzahl an Teilnehmern zu rechnen und wird Spezialwissen abgefragt, ist es sinnvoll die Befragung (z.B. Ausfüllen eines standardisierten Fragebogens) im Beisein eines Forschers durchzuführen. Dies bietet den Vorteil, dass Verständnisprobleme und Unklarheiten ausgeräumt werden können, womit sich die Validität (Güte der Messung) erhöht. Den Befragten wird damit auch die Möglichkeit geboten, ihre Antworten zu revidieren und richtigzustellen (ähnlich der Delphi-Methode).

Aufgrund begrenzter Ressourcen und aus forschungspragmatischen Gründen kann zumeist nur eine Auswahl aller ExpertInnen auf einem Fachgebiet befragt werden. Es werden daher Stichproben gezogen, um darauf basierend verallgemeinernde Schlüsse zu ziehen.

Bevor entsprechende Personen kontaktiert werden können, muss aber zunächst geklärt werden, was überhaupt unter einem/einer Experten/Expertin in einem bestimmten Fachgebiet verstanden wird. Es handelt sich dabei um Personen, die in einem klar abgrenzbaren Feld über ein spezielles Wissen verfügen und in der Befragung als Quelle von Spezialwissen fungieren.<sup>187</sup>

ExpertInnen verfügen demnach auf einem Fachgebiet über Kenntnisse und Fähigkeiten, die weit über dem Durchschnitt liegen. ExpertInnenwissen besteht in der Regel aus sehr großen Informationsmengen in Verbindung mit Vereinfachungen, wenig bekannten Fakten, Faustregeln und Heuristiken, die eine effiziente Problemlösung (in diesem Gebiet) ermöglichen.<sup>188</sup>

Die Entscheidungskriterien für die Auswahl der ExpertInnen stützt sich dabei auf theoretische Vorüberlegungen und damit auf Grundsatzfragen wie:

- Wer verfügt über die relevanten Informationen?
- Wer ist am ehesten in der Lage präzise Informationen zu geben?
- Wer ist am ehesten bereit Informationen zu geben?
- Wer von den Informanten ist verfügbar?<sup>189</sup>

<sup>187</sup> Vgl. Gläser/Laudel (2010). Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen. S. 117ff

<sup>188</sup> Vgl. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55229/expertenwissen-v9.html>. Datum des Zugriffs: 20.10.2014 (Suchbegriff: „Expertenwissen“)

<sup>189</sup> Vgl. Gorden (1969). Interviewing – Strategy, Techniques, and Tactics. S. 115ff

Die Berufserfahrung der ExpertInnen in einem abgegrenzten Fachbereich ist als weiteres wesentliches Kriterium für die Beurteilung der ExpertInnenangaben zu berücksichtigen.

Für die Erhebung von quantitativen Daten ist ein standardisierter Fragebogen ein zweckmäßiges Instrument. Aus quantitativen ExpertInnenangaben können mittels Datenfitting theoretische Verteilungsfunktionen generiert werden. Diese werden nur in Ausnahmefällen allen theoretischen Überlegungen und Charakteristika (siehe Abschnitt 5.10.1) eines Parameters entsprechen und sind daher hinsichtlich der Form der Verteilungen in Kombination mit diesen zu betrachten.

#### 5.10.4 Kombination der Erhebungsmethoden

Die hier gezeigten drei Erhebungsmethoden haben, jede für sich gesehen, entsprechende Vor- und Nachteile, weshalb Kombinationen der Erhebungsmethoden zur Anwendung gelangen sollten.

Auch Yang gibt an, dass eine Kombination aus historischen Daten und subjektiven Einschätzungen in der Praxis erforderlich sein wird, um Verteilungsfunktionen für unterschiedliche Kostenelemente abbilden zu können. Es werden nicht für alle Parameter historische Daten vorliegen bzw. könnten die Grenzen (Bandbreiten) für ein konkretes Projekt anderes eingeschätzt werden, als dies aus den historischen Daten hervorgeht.<sup>190</sup>

Folgende Kombinationen sind denkbar:

- Theoretische Überlegungen und Charakteristika und Daten aus der Praxis
- Theoretische Überlegungen und Charakteristika und Daten aus ExpertInnenbefragungen
- Theoretische Überlegungen und Charakteristika sowie Daten aus der Praxis und aus ExpertInnenbefragungen

Eine reine Kombination aus den Daten der Praxis und den ExpertInnenbefragungen erscheint nicht ideal, da die theoretischen Überlegungen und Charakteristika, die sich aus der Natur der Parameter ergeben, dann nicht in die Wahl der Verteilungsfunktionen einfließen. Gerade durch solche theoretischen Überlegungen können aber unlogische und unsinnige Verteilungsformen ausgeschlossen oder modifiziert werden.

Bei Datenfittings kommt es nicht selten vor, dass die erhobenen Werte bestmöglich durch offene Verteilungen (z.B. LogLogistic- oder Normalverteilungen) repräsentiert werden. In der Praxis bewegen sich die Werte aber innerhalb einer baupraktischen Bandbreite. Sehr hohe Werte (gegen  $+\infty$ ) können oft nach oben hin eingegrenzt werden und negative Werte (bis  $-\infty$ ) können meist ausgeschlossen werden.

Werden Daten aus der Praxis (ex post oder inter actio) mit Daten aus ExpertInnenbefragungen (ex ante) kombiniert, ist die Frage der Abgrenzung und Bereinigung wesentlich. Können die Daten zu einem Datenpool zusammengefasst werden, oder ist eine gesonderte Datenaufbereitung erforderlich? Wenn die Daten nicht direkt zusammengefasst werden können, ist es evtl. möglich zwei Fittings durchzuführen und die Verteilungsfunktionen auf Basis

<sup>190</sup> Vgl. Yang (2005). Simulation-based estimation for correlated cost elements. S. 276

von Verhältniszahlen (Prozentwerte) miteinander zu vergleichen. Zusammen mit theoretischen Überlegungen und Charakteristika der Parameter ist dann die Wahl der Verteilungsfunktionen zu treffen.

Wird die Form der Verteilung übernommen, die lage- und bandbreitenbestimmenden Parameter aber fachkundig an die gegebenen Umstände angepasst und erfolgt zusätzlich noch eine Kombination mit theoretischen Überlegungen und Charakteristika, ist in jedem Fall mit einer deutlichen Ergebnisverbesserung zu rechnen, die eine chancen-risiko-basierte Ermittlung der Baukosten und Bauzeiten zulässt.

Neben der Wahl der Verteilungsfunktionen haben auch Korrelationen (Abhängigkeiten) zwischen den Inputparametern einen Einfluss auf die ermittelten Outputs einer probabilistischen Berechnung.

## 5.11 Einfluss von Korrelationen

Bei probabilistischen Berechnungen wird meist Unabhängigkeit zwischen den Eingangsparametern vorausgesetzt. Dies wird dadurch begründet, dass es schwierig ist Korrelationen subjektiv anzugeben bzw. für eine mathematische Ermittlung von Korrelationen oft nicht die entsprechenden Daten vorhanden sind. Weiters ist die Integration von Korrelationen in die Simulationsmodelle mit zusätzlichem Aufwand verbunden.

Welchen Einfluss Korrelationen bei unterschiedlichen Rechenoperationen auf die Ergebnisse haben können, wird in diesem Abschnitt anhand von einfachen Berechnungsbeispielen gezeigt.

Chau untersuchte anhand von Dreiecksverteilungen die Auswirkungen auf die Summe von zwei Variablen.<sup>191</sup>

Hier soll auch die Differenz, das Produkt und der Quotient unter Variation der Korrelationskoeffizienten dargestellt werden. Die Bandbreite der beiden Verteilungen liegt zwischen 2 und 10, der erwartete Wert wird mit 6 angesetzt, womit sich symmetrische Verteilungen ergeben.

Ein ähnlicher Vergleich wurde auch schon von Kummer<sup>192</sup> durchgeführt.

Für die nachfolgenden Analysen werden der Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Variablen von -1 bis +1 variiert und in 25 separaten Simulationen jeweils 50.000 Iterationen mit dem Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren durchgeführt.<sup>193</sup> Der „seed“ wurde mit dem Wert 1 fixiert, um die Simulationsergebnisse bei Bedarf rekonstruieren zu können. Es werden bewusst symmetrische Verteilungen angesetzt, da lediglich der Einfluss der Korrelationen auf die Ergebnisse gezeigt werden soll. Die Auswirkungen der Schiefe wurden bereits in Abschnitt 5.8 gezeigt.

### 5.11.1 Addition

Es wird die Summe aus zwei identischen Verteilungsfunktionen (Dreiecksverteilungen) mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation gebildet. Folgende Werte werden in einem Diagramm dargestellt (siehe Abb. 5-37), um die Verände-

<sup>191</sup> Vgl. Chau (1995b). Monte Carlo simulation of construction cost using subjective data. S. 371

<sup>192</sup> Vgl. Kummer (2012). Einsatz der Monte-Carlo Simulation zur Berechnung von Baukosten und Bauzeit. S. 51ff

<sup>193</sup> Die Eingabe der Korrelationskoeffizienten erfolgt in @Risk durch symmetrische Matrizen. Sollen z.B. die Abhängigkeiten zwischen drei Parametern abgebildet werden, erfolgt dies durch die Eingabe einer 3 x 3 Matrix.

rungen des Outputs in Bezug auf den Korrelationskoeffizienten aufzuzeigen:

- 5 %-Quantil
- 95 %-Quantil
- Einfache Standardabweichung vom Mittelwert (in beide Richtungen)
- Mittelwert

Die strichlierte (horizontale) Linie in Abb. 5-37 bei 12,00 zeigt jene Summe, die bei einer deterministischen Berechnung mit den erwarteten Werten für die beiden Variablen (je 6,00) erwartet wird. Die grauen Kurven grenzen den Bereich zwischen dem 5 %- und dem 95 %-Quantil ein, der sich bei unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten ergibt. Die blauen Kurven decken die einfache Standardabweichung um den Mittelwert ab. Die schwarze Gerade entspricht dem Mittelwert der Summe aus den beiden angenommenen Variablen und ist unabhängig von den Korrelationen konstant. Aufgrund der symmetrischen Inputverteilungen sind die beiden Geraden des erwarteten Werts und der Mittelwerte (aus den Simulationen) deckungsgleich bei 12,00.

Die Bandbreite der Ergebnisse bei einem Korrelationskoeffizient nahe -1 ist sehr gering und wird immer breiter, je weiter sich dieser einem Wert von +1 nähert.

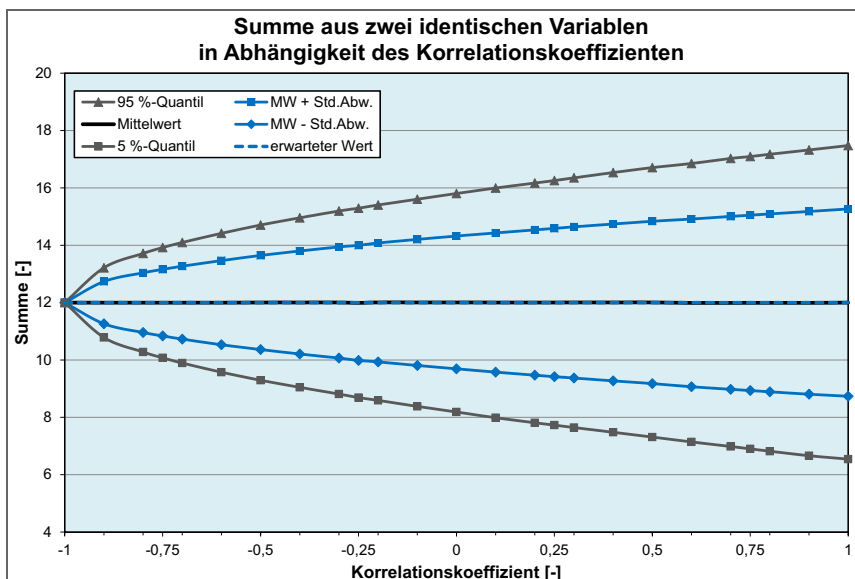


Abb. 5-37 Summe aus zwei identischen Variablen in Abhängigkeit des Korrelationskoeffizienten

Die Varianz für die Summe zweier Variablen  $x$  und  $y$  errechnet sich wie folgt:

$$\text{Var}(x + y) = \text{Var}(x) + \text{Var}(y) + 2 \cdot \text{Cov}(x, y) \quad (5-9)$$

$\text{Var}(x + y)$ .... Varianz der Summe von  $x$  und  $y$

$\text{Var}(x)$ ..... Varianz von  $x$

$\text{Var}(y)$ ..... Varianz von  $y$

$\text{Cov}(x,y)$ ..... Kovarianz von  $x$  und  $y$

Dabei ist die Kovarianz positiv, wenn eine positive Abhängigkeit zwischen den beiden Variablen herrscht und entsprechend negativ bei negativer Abhängigkeit.  $\text{Var}(x + y)$  ist am größten (kleinsten), wenn eine möglichst positive (negative) Kovarianz vorherrscht. Die Kovarianz ist null, wenn es sich um zwei unabhängige Zufallsvariablen handelt. Die Varianz der Summe entspricht dann der Summe der beiden Einzelvarianzen für  $x$  und  $y$  (siehe Glg. (5-10)).

$$\text{Var}(x + y) = \text{Var}(x) + \text{Var}(y) \tag{5-10}$$

Beim gezeigten Beispiel ist zu beachten, dass die beiden Summanden mit symmetrischen Verteilungen modelliert wurden. Werden schiefe Verteilungen angesetzt, ist der erwartete Wert einer deterministischen Berechnung vom Mittelwert der Simulationen verschieden. In Abhängigkeit der Korrelationskoeffizienten ändert sich dann auch die Wahrscheinlichkeit, dass der erwartete Wert über- oder unterschritten wird.

### 5.11.2 Subtraktion

Wird die Differenz aus den beiden identisch angenommenen Dreiecksverteilungen (2; 6; 10) gebildet, liegen der simulierte Mittelwert als auch der erwartete Wert der Differenz konstant bei 0. Die Streuung der Differenz ist umgekehrt zur Summenbildung bei einem Korrelationskoeffizient von -1 am größten und nimmt mit steigendem Korrelationskoeffizienten ab.

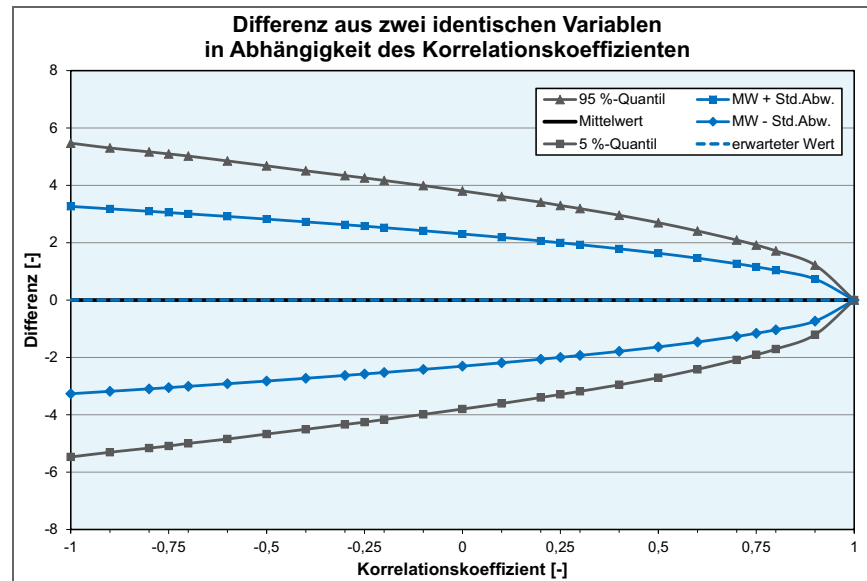


Abb. 5-38 Differenz aus zwei identischen Variablen in Abhängigkeit des Korrelationskoeffizienten

Dies wird damit begründet, dass bei einem Korrelationskoeffizient von +1 für die Bildung der Differenz jeweils ähnliche Werte aus den identischen Bandbreiten der Inputverteilungen ausgewählt werden. Dadurch vermindert sich die Streuung der Differenz bei steigendem Korrelationskoeffizient. Bei einer negativen Korrelation werden jeweils Werte aus gegensätzlichen Bereichen der Verteilungen gewählt, um die Differenz zu ermitteln. Wird

beispielsweise ein hoher Zufallswert aus der ersten Verteilung gewählt, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass bei einer Korrelation nahe -1 ein entsprechend niedriger Zufallswert aus der zweiten Verteilung gewählt wird und die Differenz damit entsprechend groß ist. Umgekehrt ergibt sich eine hohe negative Differenz, wenn von einem niedrigen Wert der ersten Verteilung ein hoher Wert der zweiten Verteilung abgezogen wird. Dieser Zusammenhang spiegelt sich in Abb. 5-38 in Form einer variierenden Streuung in Abhängigkeit der Korrelationskoeffizienten wider.

### 5.11.3 Multiplikation

Wird das Produkt aus den beiden Dreiecksverteilungen (2; 6; 10) gebildet, ergibt sich für unterschiedliche Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden Variablen ein Verlauf für die betrachteten statistischen Kenngrößen entsprechend Abb. 5-39.

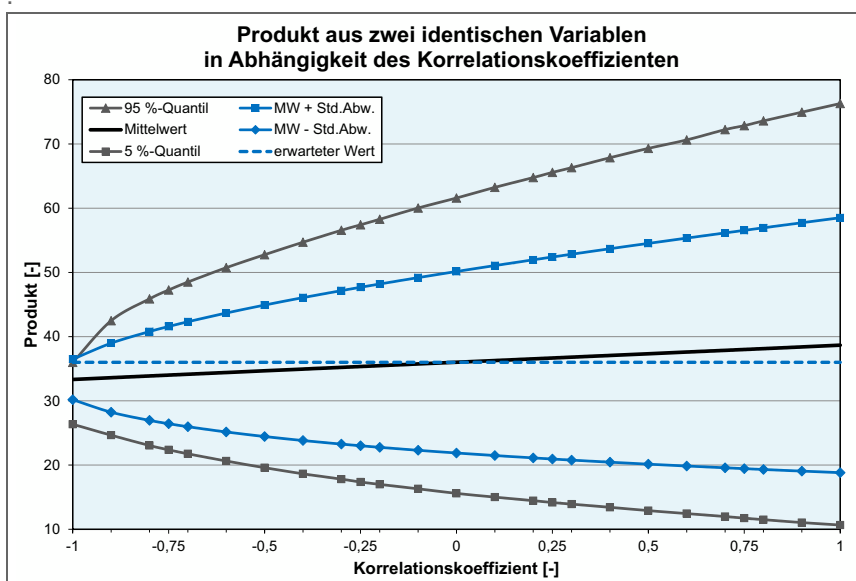


Abb. 5-39 Produkt aus zwei identischen Variablen in Abhängigkeit des Korrelationskoeffizienten

Die Bandbreite der Ergebnisse steigt mit dem Anstieg des Korrelationskoeffizienten kontinuierlich an. Auffällig ist, dass das 95 %-Quantil bei einem Korrelationskoeffizienten von -1 unter dem Mittelwert, erhöht um eine Standardabweichung (Kurve mit der Bezeichnung: „MW + Std.Abw.“), liegt. Dies ist auf die markante linksschiefe Form des Histogramms, welches die Basis für die dargestellten Datenpunkte darstellt, zurückzuführen (siehe Abb. 5-40).

Weiters ist in Abb. 5-39 ersichtlich, dass sich auch der aus den Simulationen berechnete Mittelwert mit steigendem Korrelationskoeffizient erhöht. Hier haben Korrelationen nicht nur einen Einfluss auf die Streuung der Ergebnisse, sondern auch auf den Mittelwert.

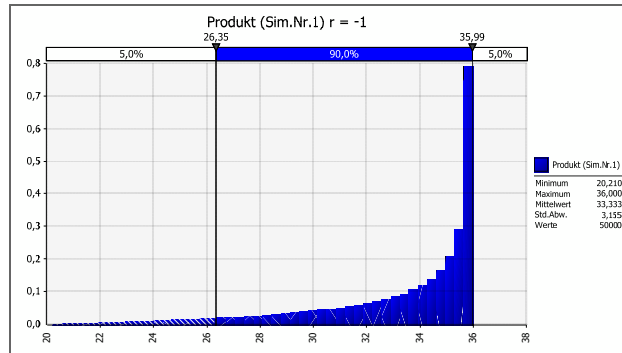


Abb. 5-40 Produkt von zwei Dreiecksverteilungen (2; 6; 10) mit einem Korrelationskoeffizienten von  $r = -1$

### 5.11.4 Division

Wird der Quotient aus den beiden Variablen (in Form von identischen Dreiecksverteilungen – 2; 6; 10) gebildet, ergibt sich mit geänderten Korrelationskoeffizienten zwischen den Parametern eine markante Änderung der Streuung der Ergebnisse. Abb. 5-41 zeigt, dass sich bei negativen Korrelationskoeffizienten eine größere und bei positiven eine kleinere Bandbreite der Simulationsergebnisse errechnet. Weiters nimmt der Mittelwert für den Quotienten aus den Simulationen mit steigendem Korrelationskoeffizienten ab.

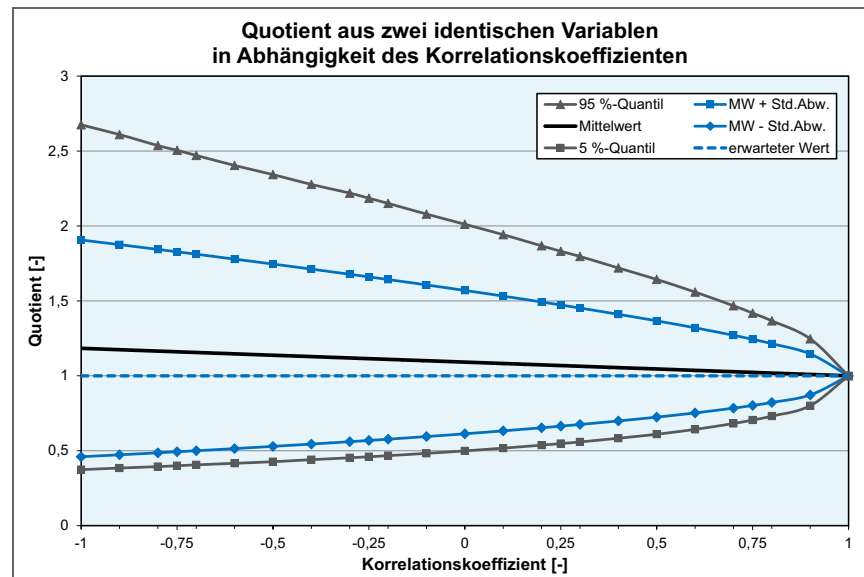


Abb. 5-41 Quotient aus zwei identischen Variablen in Abhängigkeit des Korrelationskoeffizienten

Wie bei der Multiplikation hat auch bei der Division der zugrunde gelegte Korrelationskoeffizient nicht nur Einfluss auf die Bandbreite der Ergebnisse, sondern auch auf den Mittelwert. Dieser nähert sich erst bei einem positiven linearen Zusammenhang ( $r = +1$ ) an den deterministisch erwarteten Wert für den Quotienten ( $= 1$ ) an.



### 5.11.5 Zusammenfassung – Einfluss von Korrelationen auf zwei Variablen

Bei der Addition und Multiplikation zweier Variablen vergrößert sich die Bandbreite der Ergebnisse mit steigendem Korrelationskoeffizient und erreicht bei  $r = +1$  ihr Maximum. Bei Subtraktionen und Divisionen wird die Bandbreite mit steigendem Korrelationskoeffizienten kleiner und erreicht bei  $r = +1$  ihr Minimum. Der Mittelwert aus den Simulationen bleibt bei der Addition und Subtraktion gegenüber einer Änderung des Korrelationskoeffizienten unverändert. Bei der Multiplikation und Division ändert sich auch der Mittelwert der Outputs in Abhängigkeit des Korrelationskoeffizienten. Eine Übersicht der Einflüsse von Korrelationen auf die Ergebnisse der Grundrechenarten bei zwei Variablen ist in Tab. 5-12 dargestellt.

Rechenoperation		Addition		Multiplikation		Subtraktion		Division	
		negativ	positiv	negativ	positiv	negativ	positiv	negativ	positiv
Streuung der Ergebnisse wird	größer		X		X	X		X	
	kleiner	X		X			X		X
Einfluss der Korrelationen auf den Mittelwert	ja			X					X
	nein		X				X		

Tab. 5-12 Einfluss von Korrelationen auf die Streuung und den Mittelwert getrennt nach den vier Grundrechenarten

Für baubetriebliche und bauwirtschaftliche Zusammenhänge werden häufig Additionen und Multiplikationen benötigt, die zusammen mit positiven Korrelationen die Bandbreite der Ergebnisse gegenüber jenen bei unabhängigen Inputvariablen erhöhen.

Die Ergebnisse der oben gezeigten einfachen Beispiele mit nur zwei Variablen sind für das grundsätzliche Verständnis des Einflusses von Korrelationen auf die Simulationsergebnisse sehr anschaulich. Für praktische Anwendungen sind diese Zusammenhänge aber nicht direkt anwendbar, da bei anwendungsorientierten Berechnungen meist mehrere Variablen mit unterschiedlichen Rechenoperationen verknüpft werden. Der Einfluss von variierenden Korrelationen (positiv und negativ) auf die Summenbildung wird nachfolgend dargestellt.

### 5.11.6 Einfluss von Korrelationen auf die Summe mehrerer Variablen – Praktische Anwendung mit @Risk

Chau<sup>194</sup> untersuchte den Einfluss von positiven und negativen Korrelationen auf die Summe von elf identischen Variablen. Dabei wurde angenommen, dass jeder Parameter von der ersten Variable abhängig ist, wobei sich der Betrag der angesetzten Korrelation nicht ändert. Für die Simulation wurden in der Korrelationsmatrix alle Koeffizienten zwischen der ersten und den nachfolgenden Variablen mit  $+0,9$  angesetzt (siehe Tab. 5-13).

In @Risk sind nur positive definite und positive semi-definite Korrelationsmatrizen zulässig. Die Prüfung einer eingegebenen Matrix auf Konsistenz erfolgt durch Berechnung ihrer Eigenwerte. Vom Softwareprogramm @Risk wird vor jeder Simulation eine solche Prüfung durchgeführt. Eine positive definite

<sup>194</sup> Vgl. Chau (1995b). Monte Carlo simulation of construction cost using subjective data. S. 372

Matrix hat nur positive Eigenwerte, eine positive semi-definite Matrix hat Eigenwerte, die größer oder gleich null sind. Demnach wird eine Matrix die zumindest einen negativen Eigenwert aufweist, für die weiteren Berechnungsschritte abgelehnt und muss neu definiert bzw. angepasst werden.<sup>195</sup>

Die konkrete Eingabe für das Berechnungsbeispiel (siehe Tab. 5-13) führt zu einer nicht konsistenten Korrelationsmatrix. Die restlichen Felder der symmetrischen Matrix müssen aufgefüllt und die bisher eingetragenen Korrelationskoeffizienten evtl. angepasst werden.

ANZ <sub>NEG.KORR</sub> = 0		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	A	1,00										
2	B	0,90	1,00									
3	C	0,90		1,00								
4	D	0,90			1,00							
5	E	0,90				1,00						
6	F	0,90					1,00					
7	G	0,90						1,00				
8	H	0,90							1,00			
9	I	0,90								1,00		
10	J	0,90									1,00	
11	K	0,90										1,00

**Tab. 5-13** Ansatz einer Korrelationsmatrix für den Fall, dass die Korrelationen zwischen der ersten und den nachfolgenden Variablen jeweils +0,9 entspricht

Das Softwareprogramm @Risk, mit dem auch Chau seine Untersuchungen durchgeführt hat,<sup>196</sup> prüft eingegebene Korrelationsmatrizen automatisch auf Konsistenz. Wird eine Matrix wie in Tab. 5-13 in @Risk eingegeben, wird automatisch nachgefragt, ob diese angepasst werden soll. Wählt man „Ja“ aus, rechnet @Risk mit folgender automatisch angepassten Matrix (siehe Tab. 5-14) weiter.<sup>197</sup> Diese kann als „nächstbeste“ bezeichnet werden, da sie keine besonderen Anforderungen erfüllt.<sup>198</sup>

<sup>195</sup> Vgl. <http://kb.palisade.com/index.php?pg=kb.page&id=74>. Datum des Zugriffs: 16.05.2013

<sup>196</sup> Chau verwendete @Risk Version 1.55

<sup>197</sup> Wählt man „Nein“ bzw. „Abbrechen“ kann keine Simulation durchgeführt werden und @Risk bricht den Vorgang ab.

<sup>198</sup> Unter besonderen Anforderungen wird die Fixierung der getätigten Eingaben mit Hilfe einer Anpassungsmatrix verstanden. Damit kann bei der automatischen Anpassung einer nicht konsistenten Matrix verhindert werden, dass die händisch eingegebenen Koeffizienten während dieser Anpassung verändert werden.

ANZ <sub>NEG.KORR</sub> = 0		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	A	1,00										
2	B	0,32	1,00									
3	C	0,32	0,00	1,00								
4	D	0,32	0,00	0,00	1,00							
5	E	0,32	0,00	0,00	0,00	1,00						
6	F	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00					
7	G	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00				
8	H	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00			
9	I	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00		
10	J	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	
11	K	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

Tab. 5-14 Automatisch von @Risk angepasste Korrelationsmatrix – bezogen auf die Matrix in Tab. 5-13

Anhand eines Beispiels wird veranschaulicht, wie eine nicht konsistente Matrix automatisch angepasst wird. Angenommen wird eine 3 x 3 Matrix (K) aus Glg. (5-11).

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccc}
 & A & B & C \\
 A & 1 & 0,9 & 0,8 \\
 B & 0,9 & 1 & 0 \\
 C & 0,8 & 0 & 1
 \end{array} \\
 K =
 \end{array} \quad (5-11)$$

Die Eigenwerte dieser Matrix ergeben sich wie folgt:

$$\lambda_1 = -0,204159$$

$$\lambda_2 = 1$$

$$\lambda_3 = 2,204159$$

Da einer der Eigenwerte negativ ist, handelt es sich um eine nicht konsistente Matrix und muss angepasst werden. Zu diesem Zweck wird der kleinste Eigenwert ( $\lambda_1$ ) mit der Einheitsmatrix multipliziert und von der ursprünglichen Korrelationsmatrix (K) abgezogen:

$$K' = \begin{bmatrix} 1 & 0,9 & 0,8 \\ 0,9 & 1 & 0 \\ 0,8 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,204159 & 0 & 0 \\ 0 & -0,204159 & 0 \\ 0 & 0 & -0,204159 \end{bmatrix}$$

$$K' = \begin{bmatrix} 1,204159 & 0,9 & 0,8 \\ 0,9 & 1,204159 & 0 \\ 0,8 & 0 & 1,204159 \end{bmatrix}$$

Diese neue Matrix  $K'$  wird in einem nächsten Schritt durch den Wert  $(1 - \lambda_1)$  dividiert. Die so erhaltene neue Korrelationsmatrix  $K''$  ist bereits jene angepasste Matrix, mit der eine Simulation in @Risk fortgeführt werden kann.

$$K'' = \begin{bmatrix} 1,204159 & 0,9 & 0,8 \\ 0,9 & 1,204159 & 0 \\ 0,8 & 0 & 1,204159 \end{bmatrix} / (1 + 0,204159)$$

$$K'' = \begin{bmatrix} 1 & 0,747409 & 0,664364 \\ 0,747409 & 1 & 0 \\ 0,664364 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Die neuen Eigenwerte dieser Matrix errechnen sich zu:

$$\lambda_1 = 0$$

$$\lambda_2 = 1$$

$$\lambda_3 = 2$$

Eine solche automatische Anpassung erfolgte auch bei der 11 x 11 Korrelationsmatrix für die Ermittlung der Summe aus elf Variablen. Die neue Korrelationsmatrix ist in Tab. 5-14 dargestellt.

Diese Matrix bzw. die Korrelationswerte in der ersten Spalte haben nur noch wenig mit den ursprünglich angesetzten (stark positiven) Korrelationen zu tun. Das Ergebnis der Summe aus den elf Variablen wird dadurch verfälscht.

Um diesen Umstand zu umgehen, aber trotzdem eine konsistente und damit gültige Korrelationsmatrix zu erhalten, gibt es die Möglichkeit eine „Anpassungsfaktor-Matrix“ anzusetzen, mit der die eingegebenen Korrelationen im Zuge der automatischen Anpassung „fixiert“ werden können. Die Anpassungsfaktoren sind dimensionslos und können Werte zwischen 0 und 100 annehmen. Je höher diese Faktoren sind, desto genauer wird die eingegebene Korrelation bei der automatischen Anpassung beibehalten. Damit entspricht die automatisch angepasste Korrelationsmatrix den inhaltlichen Zusammenhängen, die bei der Eingabe beabsichtigt wurden.

Die Anpassungsfaktor-Matrix für die Korrelationsmatrix in Tab. 5-13 sieht wie folgt aus:

	Anpassungs- faktor-Matrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	A											
2	B	100										
3	C	100										
4	D	100										
5	E	100										
6	F	100										
7	G	100										
8	H	100										
9	I	100										
10	J	100										
11	K	100										

Tab. 5-15 Anpassungsfaktor-Matrix – bezogen auf die Matrix in Tab. 5-13

Die neue (automatisch angepasste) Korrelationsmatrix unter Berücksichtigung der Anpassungsfaktor-Matrix entspricht jener in Tab. 5-16. Es ist zu

erkennen, dass die ursprünglich in der Spalte 1 eingetragenen Korrelationskoeffizienten auch bei der automatischen Anpassung beibehalten wurden.

ANZ <sub>NEG.KORR</sub> = 0		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	A	1,00										
2	B	0,90	1,00									
3	C	0,90	0,86	1,00								
4	D	0,90	0,79	0,72	1,00							
5	E	0,90	0,65	0,86	0,79	1,00						
6	F	0,90	0,81	0,80	0,83	0,81	1,00					
7	G	0,90	0,78	0,73	0,71	0,79	0,83	1,00				
8	H	0,90	0,81	0,79	0,82	0,80	0,75	0,82	1,00			
9	I	0,90	0,80	0,78	0,81	0,79	0,77	0,81	0,78	1,00		
10	J	0,90	0,81	0,79	0,82	0,80	0,76	0,81	0,77	0,78	1,00	
11	K	0,90	0,81	0,78	0,82	0,80	0,75	0,82	0,77	0,78	0,77	1,00

**Tab. 5-16** Angepasste Korrelationsmatrix unter Berücksichtigung der Anpassungsmatrix in Tab. 5-15 – bezogen auf die Korrelationsmatrix in Tab. 5-13

Mit dieser neuen Korrelationsmatrix und den elf Variablen kann mittels Monte-Carlo-Simulation (Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren) eine Verteilung der Summe errechnet werden. Im gegenständlichen Fall wurden 50.000 Iterationen durchgeführt. Es werden symmetrische Dreiecksverteilungen (Minimum: 2; erwarteter Wert: 6 und Maximum: 10) zur Berechnung der Summe angesetzt.

Für die weiteren Untersuchungen wurden die positiven Korrelationen in der ersten Spalte der Tab. 5-13 nach und nach durch negative Korrelationen ( $r = -0,9$ ) ersetzt, bis nur noch negative Korrelationen vorhanden waren. Mit der Anpassungsfaktor-Matrix (Tab. 5-15) wurden jeweils automatisch konsistente Korrelationsmatrizen erzeugt. Die elf Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter (Dreiecksverteilungen: 2; 6; 10) wurden für die Summenbildung nicht verändert. Die Ergebnisse der Summe werden auf Basis der variierenden Korrelationen in Form eines Diagramms dargestellt. Neben dem Mittelwert und dem erwarteten Wert der deterministischen Berechnung werden auch noch nachfolgende Werte je Simulation aufgetragen (siehe Abb. 5-42):

- 5 %-Quantil
- 95 %-Quantil
- Einfache Standardabweichung vom Mittelwert (in beide Richtungen)

Vergleichend werden die gleichen statistischen Werte auch für eine unkorrelierte Berechnung strichliert eingezeichnet.

Es kann festgestellt werden, dass bei einem ausgeglichenen Verhältnis zwischen positiven und negativen Korrelationen die geringste Bandbreite für die Summe aus elf identischen Variablen festgestellt werden kann. Die Bandbreite der Ergebnisse wird lediglich durch die entsprechende Wahl der Korrelationen um ein Vielfaches eingengt werden, ohne dass die Bandbreite der Eingangsvariablen verändert wird. Im Vergleich zu unkorrelierten Berech-

nungen ergeben sich je nach Wahl der Korrelationskoeffizienten breitere oder engere Bandbreiten für die Ergebnisse.

Bei dem gezeigten Beispiel ist zu beachten, dass alle Summanden mit symmetrischen Verteilungen modelliert wurden. Werden schiefe Verteilungen angesetzt, ist der erwartete Wert einer deterministischen Berechnung vom Mittelwert der Simulationen verschieden.

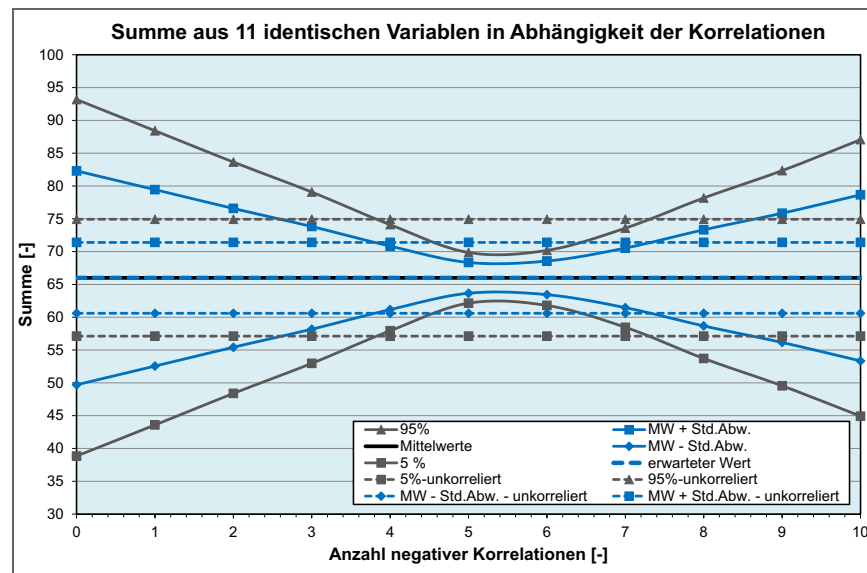


Abb. 5-42 Summe aus 11 identischen Variablen in Abhängigkeit der Korrelationen im Vergleich mit dem unkorrelierten Ergebnis

## 5.12 Korrelationen in der Bauwirtschaft

Nachdem auf den Einfluss von Korrelationen bei probabilistischen Berechnungen eingegangen wurde, werden nachfolgend ausgewählte Angaben aus der baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Literatur angeführt, in denen auf den Einsatz und die Anwendbarkeit von Korrelationen bzw. auf konkrete Koeffizienten zwischen Berechnungsparametern eingegangen wird. Die Literaturangaben werden am Ende dieses Abschnitts in einer Matrix vergleichend gegenübergestellt und enthalten auch die jeweiligen Erhebungsmethoden für die Korrelationen.

### 5.12.1 Hruschka

Auf Basis empirischer Daten konnte Hruschka einen positiven Zusammenhang zwischen dem Aufwandswert für das Betonieren und dem Schalungsgrad sowie zwischen dem manuellen Aufwandswert beim Herstellen von Beton- bzw. Stahlbetonbauteilen im Hochbau (Gesamt-Aufwandswert) und dem Schalungsgrad angeben. Mit steigendem Schalungsgrad ist auch mit einem Anstieg des Aufwandswerts zu rechnen.<sup>199</sup>

Weiters wurde auch ein positiver Zusammenhang zwischen den erforderlichen Arbeitsstunden und dem Baustoffgewicht je m<sup>3</sup> umbauten Raum festgestellt.<sup>200</sup>

### 5.12.2 Golenko

Golenko gibt für die stochastische Netzplanberechnung an, dass die Berücksichtigung von korrelierten Vorgängen eine große Bedeutung für die Anwendung hat, da durch diese oft wesentliche Parameteränderungen hervorgerufen werden.<sup>201</sup>

Konkrete Korrelationswerte werden nicht explizit angeführt.

### 5.12.3 Dinort

Dinort beschäftigte sich mit maschinenintensiven Arbeiten und gibt an, dass bei der Erfassung von stochastischen Einflüssen darauf zu achten ist, dass zwischen einzelnen Ereignissen kein direkter Zusammenhang besteht, damit einfachere Berechnungsverfahren eingesetzt werden können. Sämtliche Variablen werden als unabhängig voneinander angenommen, da ansonsten eine Berechnung mittels Faltung nur erschwert möglich ist.<sup>202</sup>

### 5.12.4 Schulz

In der Mathematik werden die Abhängigkeiten zwischen zwei Größen durch Funktionen abgebildet (z.B.  $y = f(x)$ ). Ist in der Mathematik eine Größe von einer anderen nicht abhängig, so kommt diese auch in der Funktion dieser nicht vor – es herrscht Unabhängigkeit.<sup>203</sup>

In der Statistik sind „Abhängigkeit“ und „Unabhängigkeit“ Grenzfälle für zahlenmäßige Beziehungen. Um sich realistischer Zusammenhänge zu bedienen und nicht an die beiden Grenzfälle gebunden zu sein, werden Korrelationen angewendet.<sup>204</sup>

Schulz teilt den Bereich möglicher Korrelationen (zwischen -1 und +1) in sieben Fälle ein und gibt an, dass fast alle Wirtschaftsvorgänge mit Korrelationen zwischen 0 und +1 behaftet sind.<sup>205</sup>

„Dafür gibt es plausible Erklärungen. Wenn der Teil eines Projektes günstig oder ungünstig abläuft, dann geht es oft mit benachbarten Projektteilen ähnlich. Sei es, daß die Organisation gut oder schlecht gelang; sei es, daß das Wetter mit- oder dagegenspielte, oder sei es, daß das Personal hervorragend oder weniger befähigt war.“<sup>206</sup>

Schulz gibt an, dass Korrelationen zwar in der Theorie von großer Bedeutung sind (da Korrelationen zwischen Teilvorgängen einen Einfluss auf die Streuung von Gesamtvorgängen haben), für das angewandte Rechnen

<sup>199</sup> Vgl. Hruschka (1968). Die Anwendung des Normprodukts in der Baubetriebsplanung, Erläutert am Beispiel der Rohbauarbeiten im Hochbau. S. 51ff; 75ff

<sup>200</sup> Vgl. Hruschka (1968). Die Anwendung des Normprodukts in der Baubetriebsplanung, Erläutert am Beispiel der Rohbauarbeiten im Hochbau. S. 94f

<sup>201</sup> Vgl. Golenko (1972). Statistische Methoden der Netzplantechnik. S. 112ff

<sup>202</sup> Vgl. Dinort (1977). Berücksichtigung von stochastischen Einflüssen in der Kostenrechnung einer Bauunternehmung. S. 24ff

<sup>203</sup> Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 47

<sup>204</sup> Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 47

<sup>205</sup> Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 77

<sup>206</sup> Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 78

jedoch keinen praktischen Wert haben. Er erachtet es als undenkbar, dass die Korrelationszahlen für alle Fälle des Kalkulierens ermittelt werden können, gibt aber an, dass Korrelationen dabei helfen, die Streuungseigenschaften stochastischer Vorgänge zu durchschauen.<sup>207</sup>

Bei der Erstellung seiner Arbeit (1980) hatte Schulz nicht die Rechnerleistung zur Verfügung, die heute eingesetzt werden kann und wandte auch nicht die Monte-Carlo-Methode an. Er kommt jedoch zu dem wichtigen Schluss, dass Korrelationen die Streuung von Berechnungsergebnissen beeinflussen. Somit ist es durchaus erstrebenswert, hier weitere Untersuchungen durchzuführen, um eine Verbesserung der Ergebnisse aus probabilistischen Berechnungen zu erzielen.

### 5.12.5 Lederer

Lederer verwendete für seine Berechnungen ein deterministisches Berechnungsmodell, welches neben deterministischen Eingangswerten auch Zufallsgrößen zulässt. Er gibt jedoch an, dass dies alleine noch nicht für eine wirklichkeitsnahe Abbildung des tatsächlichen Geschehens reicht. Es müssen noch die gegenseitigen Abhängigkeiten des stochastischen Verhaltens und die Abhängigkeiten der Vorgänge untereinander berücksichtigt werden.<sup>208</sup>

Der Ansatz stochastischer Unabhängigkeit bei Netzplanberechnungsmethoden steht lt. Lederer im offenen Widerspruch zu vielen praktischen Gegebenheiten. Die Möglichkeit des Einsatzes derartiger Methoden wird damit stark eingeschränkt, da die Abbildung der Wirklichkeit zu ungenau ist. Eine Möglichkeit die stochastische Abhängigkeit zwischen zwei beliebigen Vorgangsgrößen herzustellen, ist die Verwendung der gleichen Zufallszahl wenn die Korrelation +1 sein soll. Wird eine Korrelation von -1 angesetzt, wird einmal die Zufallszahl  $z$  verwendet und für den zweiten Parameter  $1-z$ .<sup>209</sup>

Folgende Abhängigkeiten werden von Lederer als für die Praxis relevant angeführt:

- „Bei volumenabhängigen Dauern sind alle Vorgangsdauern miteinander korreliert, die sich auf das gleiche Volumen beziehen.
- Im Einheitspreisvertrag sind alle Vorgangsleistungen miteinander korreliert, die sich auf das gleiche Volumen beziehen.
- Die Baufortschritte verschiedener Vorgänge, die vom selben Produktionsapparat ausgeführt werden, sind möglicherweise korreliert.“<sup>210</sup>

Aus der Formulierung von Lederer und den Zusammenhängen die sich auf das Volumen bzw. auf einen gemeinsamen Produktionsapparat beziehen, werden für die drei angeführten Beispiele positive Korrelationen vermutet.

<sup>207</sup> Vgl. Schulz (1980). Risikorechnung bei der Preiskalkulation. S. 52

<sup>208</sup> Vgl. Lederer (1982). Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung. S. 46

<sup>209</sup> Vgl. Lederer (1982). Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung. S. 71

<sup>210</sup> Lederer (1982). Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung. S. 72



### 5.12.6 Liberda

Liberda gibt in seiner Dissertation qualitativ an, dass folgende Zufallsvariablen fallweise sehr hoch miteinander korrelieren:<sup>211</sup>

- Bruttomittelohn mit dem Arbeitsaufwand
- Arbeitsaufwand mit dem Stoffverbrauch
- Stoffkosten mit dem Stoffverbrauch

„Für die stochastische Erfassung des Wagnisses kann aber davon ausgegangen werden, daß diese Korrelationen durch Entscheidungen der Arbeitsvorbereitung oder des Kalkulanten ausgeschlossen werden. [...] Durch die Auswahl des Schalungssystems können die Korrelationen zwischen Stoffkosten, Stoffverbrauch und Arbeitsaufwand ausgeschlossen werden. Da es sich hier um eine Kostenvorausschätzung handelt und nicht um einen Soll-Ist-Vergleich, müßte es möglich sein, alle diese und sämtliche weitere Korrelationen durch Entscheidungen vor Kalkulationsbeginn auszuschließen. Damit wird die korrelative Verknüpfung der Zufallsvariablen ausgeschlossen.“<sup>212</sup>

Wie Korrelationen konkret durch Entscheidungen ausgeschlossen werden können, wird von Liberda nicht weiter ausgeführt. Es ist aus Sicht des Verfassers schon möglich den Aufwandswert für das Schalen bei einem spezifischen Schalungsgrad durch die Wahl eines Schalungssystems zu beeinflussen. Damit jedoch eine Korrelation auszuschließen, erscheint nicht plausibel.

Liberda führt weiter aus, dass verschiedene Aufwandswerte nicht unabhängig voneinander sind, da jeder Aufwandswert von Faktoren für unsichere Einflüsse (z.B. Wetter, Mannschaft, Verkehr, Grundwasser) beeinflusst wird. Aufwandswerte für das Schalen und Aufwandswerte für das Bewehren werden z.B. beide von der Witterung beeinflusst (wenn diese Arbeiten nicht in einem geschützten Raum durchgeführt werden können). Erhöht sich also der Aufwandswert für das Schalen aufgrund widriger Witterungsverhältnisse, müsste sich auch der Aufwandswert für das Bewehren erhöhen. Ein Faktor, der die Baustellenorganisation bewertet, hat demnach auf alle Arbeiten auf der Baustelle einen Einfluss. Es wären alle Arbeiten auf der Baustelle voneinander in geringem Ausmaß abhängig.<sup>213</sup>

Der Zusammenhang zwischen Bruttomittelohn und Leistungsansatz<sup>214</sup> wurde von Liberda, sehr verallgemeinernd, in erster Näherung als Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,95 angenommen. Es wird also bei einem hohen Bruttomittelohn ein niedriger Leistungsansatz erwartet und umgekehrt (siehe Abb. 5-43).<sup>215</sup>

Dies bedeutet im Wesentlichen, dass beim Einsatz von höher qualifizierten Arbeitskräften (= höherer Bruttomittelohn) geringere Aufwandswerte erwartet werden.

<sup>211</sup> Vgl. Liberda (1985). Ermittlung des Kalkulationswagnisses im Bauwesen durch stochastische Berechnung der Herstellkosten. S. 28f

<sup>212</sup> Liberda (1985). Ermittlung des Kalkulationswagnisses im Bauwesen durch stochastische Berechnung der Herstellkosten. S. 29f

<sup>213</sup> Vgl. Liberda (1985). Ermittlung des Kalkulationswagnisses im Bauwesen durch stochastische Berechnung der Herstellkosten. S. 30f und 80

<sup>214</sup> Der „Leistungsansatz“ wird mit Lohnstunden je Einheit angegeben und entspricht damit dem Aufwandswert [Std/MEH].

<sup>215</sup> Vgl. Liberda (1985). Ermittlung des Kalkulationswagnisses im Bauwesen durch stochastische Berechnung der Herstellkosten. S. 85

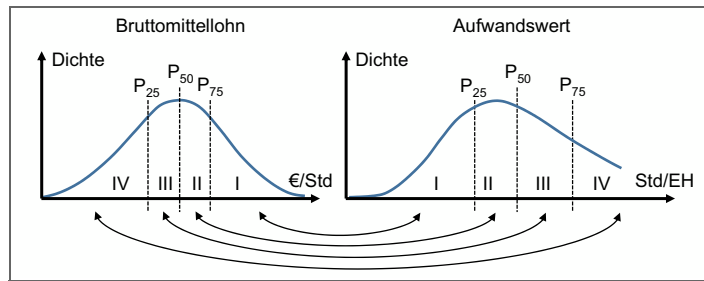


Abb. 5-43 Zusammenhang zwischen Bruttomittellohn und Aufwandswert<sup>216</sup>

### 5.12.7 Touran/Wiser

Touran/Wiser ermittelten aus historischen Daten für 26 Projekte in Massachusetts (errichtet zwischen 1981 und 1983) eine Korrelationsmatrix für 12 Kostenkomponenten (12 x 12 Matrix). Diese wurde in einem weiteren Schritt auf eine 6 x 6 Matrix (siehe Tab. 5-17 – Spalten und Zeilenkürzel wurden entsprechend der Originalquelle übernommen) verringert, indem jene Kostenkomponenten mit niedrigen Korrelationskoeffizienten als unabhängig angenommen wurden.<sup>217</sup>

Korrelationskoeffizienten nach Touran/Wiser (1992)		Gemeinkosten	Schlosserarbeiten	Zimmererarbeiten	Feuchtigkeitsabdichtungen	Haustechnik	Elektrikerarbeiten
		A	E	F	G	Q	R
Gemeinkosten	A	1					
Schlosserarbeiten	E	0,67	1				
Zimmererarbeiten	F	0,51	0,44	1			
Feuchtigkeitsabdichtungen	G	0,30	0,36	0,62	1		
Haustechnik	Q	0,58	0,69	0,58	0,74	1	
Elektrikerarbeiten	R	0,28	0,68	0,43	0,42	0,75	1

Tab. 5-17 Korrelationsmatrix für Kostenkomponenten im Hochbau<sup>218</sup>

Es fällt auf, dass jene Korrelationen die als wesentlich erachtet und in der 6 x 6 Matrix verblieben sind, durchwegs positive Werte aufweisen und zwischen +0,28 und +0,75 liegen.

### 5.12.8 Chau

Das Ausmaß und die Eigenschaften von Korrelationen hängen stark von der Anzahl der Komponenten (Sub-Systeme) und deren Definition ab. Generell gilt jedoch, dass je größer die Anzahl der Komponenten ist (entspricht auch dem Detaillierungsgrad des Gesamtsystems) desto größer ist auch die Chance, dass Abhängigkeiten existieren. Die Annahme von unabhängigen Eingangsparametern stimmt nicht mit den empirischen Fakten überein und verfälscht dadurch die Simulationsergebnisse.<sup>219</sup>

<sup>216</sup> Liberda (1985). Ermittlung des Kalkulationswagnisses im Bauwesen durch stochastische Berechnung der Herstellkosten. S. 86

<sup>217</sup> Vgl. Touran/Wiser (1992). Monte Carlo Technique with Correlated Random Variables. S. 266ff

<sup>218</sup> Vgl. Touran/Wiser (1992). Monte Carlo Technique with Correlated Random Variables. S. 267f

Ein Weg um Abhängigkeiten zu vermindern ist jener, ein Gesamtsystem in weniger Teilsysteme zu zerlegen bzw. abhängige Komponenten in Gruppen zusammenzufassen. Allerdings ist es für ExpertInnen schwieriger die Kosten für große oder komplexe Teilsysteme (z.B. die gesamten Stahlbetonarbeiten) abzuschätzen. Ein Extremfall wäre die Abschätzung der Kosten für ein gesamtes Projekt, was zwar Abhängigkeiten ausschließen, eine Berechnung mit der Monte-Carlo-Methode jedoch überflüssig machen würde. Generell ist mit geringerer Sicherheit der subjektiven Daten zu rechnen, wenn die Größe und Komplexität von Teilkomponenten zunimmt. ExpertInnen können die Kosten für ein kleines Teilsystem besser abschätzen als für einen großen Gesamtkomplex.<sup>220</sup>

Das Problem bei der Risikobetrachtung ist es, ein geeignetes Gleichgewicht zwischen der Größe der Teilsysteme (Detaillierungsgrad) und den auftretenden Abhängigkeiten zwischen den Systemen zu finden.<sup>221</sup>

Wie groß die Korrelationen zwischen verschiedenen Parametern tatsächlich sind, ermittelte Chau anhand von ausgeführten Projekten. Für die Elementarkosten von acht Bürogebäuden in Sydney und für Elektroinstallationen von sieben Gebäuden in Hong Kong wurden Rangkorrelationen berechnet.<sup>222</sup>

Daten abgeschlossener Projekte liegen aber nicht immer vor oder können nur mit erhöhtem Aufwand und der Durchführung einer strengen Datenanalyse erhalten werden. Für diesen Fall ist es zweckmäßig Korrelationen nach logischen Hierarchien zu kategorisieren.<sup>223</sup>

Chau schlägt für den leichteren Umgang mit Korrelationen Kategorien vor, wobei jeweils der Mittelwert jeder Kategorie für die Berechnungen herangezogen wird. (siehe Tab. 5-18).

Koeffizient	Kategorie	Koeffizient – Mittelwert
-1,0 bis -0,7	stark negativ	-0,85
-0,7 bis -0,4	mittel negativ	-0,55
-0,4 bis -0,1	schwach negativ	-0,25
-0,1 bis +0,1	unabhängig	0,00
+0,1 bis +0,4	schwach positiv	+0,25
+0,4 bis +0,7	mittel positiv	+0,55
+0,7 bis +1,0	stark positiv	+0,85

Tab. 5-18 Kategorisierung von Korrelationskoeffizienten<sup>224</sup>

### 5.12.9 Raftery

Raftery warnt davor, den Einfluss von Korrelationen zu vernachlässigen, da diese größere Auswirkungen auf die Outputs haben als die Wahl der Verteilungsfunktionen. Der Anwender muss jedoch einige Erfahrungen mitbringen und die Details des verwendeten Softwareprogramms kennen, um Korrelationen in den Berechnungen adäquat berücksichtigen zu können.<sup>225</sup>

Abhängigkeiten zwischen spezifischen Parametern oder Angaben zu Korrelationskoeffizienten werden von Raftery nicht angeführt.

<sup>219</sup> Vgl. Chau (1995b). Monte Carlo simulation of construction cost using subjective data. S. 370

<sup>220</sup> Vgl. Chau (1995b). Monte Carlo simulation of construction cost using subjective data. S. 370

<sup>221</sup> Vgl. Chau (1995b). Monte Carlo simulation of construction cost using subjective data. S. 370

<sup>222</sup> Vgl. Chau (1995b). Monte Carlo simulation of construction cost using subjective data. S. 369ff

<sup>223</sup> Vgl. Touran/Wiser (1992). Monte Carlo Technique with Correlated Random Variables. S. 269f

<sup>224</sup> Vgl. Chau (1995b). Monte Carlo simulation of construction cost using subjective data. S. 381

<sup>225</sup> Vgl. Raftery (1999). Risk Analysis in Project Management. S.89

### 5.12.10 Link

Link gibt in ihrer Dissertation an, dass wenn miteinander korrelierende Variablenpaare vorhanden sind, diese erkannt und in die Simulation integriert werden, die Vorhersagegenauigkeit der Simulationsergebnisse beträchtlich gesteigert werden kann. Als Beispiel für eine positive Korrelation wird der Zusammenhang zwischen Energiekosten und Inflation gesehen. Ist die Inflation hoch, werden mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die Energiekosten hoch sein. Eine negative Korrelation wird zwischen dem Produktpreis und der Verkaufszahl eines Produkts vermutet. Sinkt der Preis, ist eine höhere Verkaufszahl zu erwarten und umgekehrt.<sup>226</sup>

Beim Zusammenhang zwischen dem Eintritt von Schlechtwetter (Wetterrisiko) und einer damit verbundenen Terminverschiebung wird eine positive Korrelation vermutet. Hingegen wird zwischen dem Dokumentationsaufwand während der Bauausführung und dem Risiko von Auseinandersetzungen bei der Abrechnung und Übernahme eine negative Korrelation erwartet. Link gibt weiter an, dass Korrelationen individuell für jedes Projekt abgestimmt werden müssen und keine allgemeinen Aussagen zu Korrelationen der einzelnen Risiken untereinander getätigt werden können.<sup>227</sup>

Im Anhang der Dissertation von Link werden für ein Hochbauprojekt Überlegungen und Abschätzungen für Korrelationen zwischen unterschiedlichen Risiken angegeben.<sup>228</sup>

### 5.12.11 Yang

Bei einer Untersuchung von Yang wurden die Korrelationen zwischen acht Kostenkomponenten mit Hilfe von Daten aus 216 ausgeführten Bürobauprojekten in England ermittelt. Angegeben wird eine 8 x 8 Matrix (siehe Tab. 5-19), die sowohl rechnerisch ermittelte als auch subjektiv angesetzte Korrelationskoeffizienten enthält. Es wird angeführt, dass rein rechnerisch ermittelte Korrelationskoeffizienten geprüft und gegebenenfalls an ein konkretes Projekt angepasst werden müssen.<sup>229</sup>

Korrelationskoeffizienten nach Yang (2005)	Gründung	Rohbau	Innenputz, Beläge und Verkleidungen	Ausstattung und Einrichtung	Technische Anlagen	Außenanlagen	vorbereitende Arbeiten	Zuschläge
Gründung	1							
Rohbau	0,33	1						
Innenputz, Beläge und Verkleidungen	0,26	0,52	1					
Ausstattung und Einrichtung	0,10	0,26	0,28	1				
Technische Anlagen	0,28	0,57	0,64	0,33	1			
Außenanlagen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1		
vorbereitende Arbeiten	0,35	0,37	0,44	0,18	0,39	0,00	1	
Zuschläge	0,23	0,28	0,34	0,21	0,29	0,00	0,36	1

Tab. 5-19 Korrelationsmatrix nach Yang<sup>230</sup>

<sup>226</sup> Vgl. Link (1999). Risikobewertung von Bauprozessen – Modell ROAD – Risk and Opportunity Analysis Device. S. 122

<sup>227</sup> Vgl. Link (1999). Risikobewertung von Bauprozessen – Modell ROAD – Risk and Opportunity Analysis Device. S. 135

<sup>228</sup> Vgl. Link (1999). Risikobewertung von Bauprozessen – Modell ROAD – Risk and Opportunity Analysis Device. Anhang P

<sup>229</sup> Vgl. Yang (2005). Simulation-based estimation for correlated cost elements. S. 279ff

<sup>230</sup> Vgl. Yang (2005). Simulation-based estimation for correlated cost elements. S. 280

Es fällt auf, dass durchwegs positive Korrelationen zwischen den Kostenkomponenten angegeben wurden und die Kosten für Außenanlagen als unabhängig gegenüber den restlichen Parametern erachtet werden (subjektiver Korrelationskoeffizient).

Anhand einer Fallstudie wurde der Einfluss der Korrelationen – gegenüber unkorrelierten Kostenkomponenten – auf die Projektkosten je m<sup>2</sup> untersucht. Bei der Einbeziehung von Korrelationen in die Berechnungen erhöhte sich die Streuung deutlich und es konnte auch ein Einfluss auf den Mittelwert festgestellt werden.<sup>231</sup>

### 5.12.12 Rohr

Von Rohr wird kritisiert, dass in der Literatur meist stillschweigend Unabhängigkeit zwischen einzelnen Vorgängen vorausgesetzt wird. Durch Beispiele wird belegt, dass dieser Umstand nicht der Realität entspricht:

- „Widriges Wetter kann zu einem hohen Krankheitsstand und damit zu einer Verlangsamung aller Vorgänge führen (negative Korrelation).
- Ist der Kranfahrer ungeübt, wirkt sich das auf alle Vorgänge aus, die auf die Kranandienung angewiesen sind (negative Korrelation).
- Gibt es Probleme im Transportbetonwerk, kann dies Auswirkungen auf alle Betoniervorgänge geben (negative Korrelation).
- Ist die Baustelle im zeitlichen Verzug, kann sich dies motivierend für alle Beschäftigten auswirken und damit zu einer Beschleunigung aller Vorgänge führen (positive Korrelation).“<sup>232</sup>

Erfolgt die Beschreibung von Zusammenhängen nicht durch Einheiten und Werte sondern nur über eine schriftliche Beschreibung, ist die Art der Korrelation (positiv oder negativ) nicht immer eindeutig zu benennen.

Bei den Beispielen, die von Rohr beschreibend angeführt werden, sind die Angaben hinsichtlich der Korrelationen zu hinterfragen. Wird der plausible Zusammenhang zwischen den Problemen im Mischwerk und der Dauer der Betoniervorgänge auf Basis von Zeiteinheiten modelliert, wird mit einer langen Mischdauer auch tendenziell ein längerer Betoneinbau auf der Baustelle (aufgrund von Wartezeiten) verbunden sein. Im Modell müsste in diesem Fall eine positive Korrelation angesetzt werden.

Ähnlich verhält es sich mit dem Zusammenhang zwischen Motivation und der Dauer von Vorgängen. Erfolgt die Modellierung in der Art, dass eine hohe Motivation durch einen Faktor beschrieben wird, der für niedrige Motivation einen geringen Wert und für hohe Motivation einen größeren Wert annimmt, wird eine negative Korrelation anzusetzen sein, da mit hoher Motivation niedrige Vorgangsdauern verbunden sein werden und umgekehrt.

Die Frage ob positive oder negative Korrelationen zu erwarten sind, hängt somit auch wesentlich von der Modellierung der beschriebenen Zusammenhänge ab.

Rohr nimmt für seine Arbeit als notwendige Vereinfachung unabhängige Zeitwerte an.<sup>233</sup>

<sup>231</sup> Vgl. Yang (2005). Simulation-based estimation for correlated cost elements. S. 279ff

<sup>232</sup> Rohr (2005). Optimierung der Bauproduktion durch Simulation von Prozessen. S. 18

<sup>233</sup> Vgl. Rohr (2005). Optimierung der Bauproduktion durch Simulation von Prozessen. S. 18

### 5.12.13 Feik

Da Korrelationen sowie die Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Bandbreiten der Berechnungsparameter ebenfalls von ExpertInnen abzuschätzen wären, gibt Feik an, dass es den Risikobearbeitern im Zuge der Risikoanalyse kaum zuzumuten ist noch einen Parameter (nämlich die Korrelationen) abzuschätzen und, dass dies der Akzeptanz des sensiblen Themas der Risikobewertung wenig zuträglich wäre.<sup>234</sup>

### 5.12.14 Girmscheid/Busch

Girmscheid/Busch führen an, dass zwischen zwei oder mehreren Risiken Abhängigkeiten in Form von Korrelationskoeffizienten bestehen können und, dass diese relativ einfach in Form von Korrelationsmatrizen in Monte-Carlo-Simulationen berücksichtigt werden können.<sup>235</sup>

Obwohl die Berücksichtigung von Korrelationen als ein zentrales Problem der Risikoaggregation angesehen wird, halten Girmscheid/Busch fest, dass es bisher noch keinen überzeugenden Ansatz für eine durchgehende Erfassung aller Abhängigkeiten zwischen Risiken bzw. Projekten gibt. Für eine vorsichtige Risikobewertung wird daher der Ansatz stochastischer Unabhängigkeit zwischen Risiken empfohlen.<sup>236</sup>

Werden Abhängigkeiten berücksichtigt, müssen die Korrelationswerte meist durch ExpertInnen geschätzt werden, wenn keine ausreichende Datenbasis vorhanden ist, wodurch subjektive Elemente in die Risikobeurteilung einfließen. Bei berechneten Korrelationskoeffizienten ist zumindest eine denklogische Überprüfung des ermittelten Zusammenhangs durchzuführen.<sup>237</sup>

Für die Aggregation von Risikokosten wird empfohlen, auf die Anwendung negativer Korrelationen zu verzichten, um einen zusätzlichen „Sicherheitspolster“ einzubauen.<sup>238</sup>

Girmscheid/Busch geben für interne und externe Projektrisiken mögliche Korrelationen an. Dabei wird in einen möglichen und einen wahrscheinlichen Bereich unterschieden.<sup>239</sup> Die Bandbreiten der angegebenen Korrelationskoeffizienten sind in Tab. 5-20 (Seite 200) angeführt.

### 5.12.15 Gleißner

Als einen schwerwiegenden Fehler bei der Risikoanalyse führt Gleißner die fehlende oder mangelhafte Berücksichtigung von inhaltlichen Abhängigkeiten und Korrelationen an.<sup>240</sup>

Die Bedeutung von Korrelationen wird auch im Zusammenhang mit der Risikoaggregation – die mehr als die reine Addition von Risiken darstellt – hervorgehoben und bezieht sich auf die Wechselbeziehungen zwischen Einzelrisiken.<sup>241</sup>

<sup>234</sup> Vgl. Feik (2006). Elektronisch gestütztes Risikomanagement im Bauwesen. S. 29f und 93

<sup>235</sup> Vgl. Girmscheid/Busch (2008). Projektrisikomanagement in der Bauwirtschaft. S. 151ff

<sup>236</sup> Vgl. Girmscheid/Busch (2008). Unternehmensrisikomanagement in der Bauwirtschaft. S. 79

<sup>237</sup> Vgl. Girmscheid/Busch (2008). Unternehmensrisikomanagement in der Bauwirtschaft. S. 80 und 101

<sup>238</sup> Vgl. Girmscheid/Busch (2008). Unternehmensrisikomanagement in der Bauwirtschaft. S. 117

<sup>239</sup> Vgl. Girmscheid/Busch (2008). Unternehmensrisikomanagement in der Bauwirtschaft. S. 116

<sup>240</sup> Vgl. Gleißner (2011). Grundlagen des Risikomanagements im Unternehmen – Controlling, Unternehmensstrategie und wertorientiertes Management. S. 251

### 5.12.16 Sander

In seiner Dissertation führt Sander an, dass der Einsatz von Korrelationen das Ergebnis verbessern soll, ohne dabei den Anwender zu überfordern.<sup>242</sup>

Er gibt an, dass bei der Detailbewertung von Risiken generell die Korrelationen mit dem Rangkorrelationskoeffizienten von +1 (vollständige, monotone Korrelation) als ausreichend und realitätsnah angesehen werden können, da auch die Eingangswerte auf Annahmen beruhen und damit unsicher sind.<sup>243</sup>

Die Auswirkungen von Korrelationen auf verschiedene Rechenoperationen (Addition und Multiplikation) bei zwei Zufallsgrößen wurden untersucht. Sander setzte weiters eine 4 x 4 Korrelationsmatrix für zwei Leistungspositionen mit jeweils einem Parameter für die Menge und einem Parameter für den Preis an. Weiters wurden auch praktische Beispiele für unterschiedliche Korrelationszustände angegeben.<sup>244</sup>

Aus Sicht des Verfassers ist eine generelle Empfehlung für einen Korrelationskoeffizienten von +1 zu hinterfragen, da es sich dabei um einen perfekten positiven, linearen Zusammenhang zwischen zwei Variablen handelt.

### 5.12.17 Krempel

In einer Masterarbeit analysierte Krempel die Ergebnisse einer ExpertInnenbefragung, die an der TU Graz von Hofstadler durchgeführt wurde. Es wurden bei dieser Befragung Aufwandswerte für das Ein- und Ausschalen von Decken, gelagert auf rechteckigen bzw. runden Stützen, für unterschiedliche Grundrissklassen ( $K_0$ ,  $K_1$  und  $K_2$ ) erhoben. Sie konnte dabei signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen folgenden Parametern feststellen:<sup>245</sup>

- zwischen den Aufwandswerten für das Ein- und Ausschalen (Flachdecken auf rechteckigen Stützen gelagert) für die Grundrissklassen  $K_0$  (einfach) und  $K_1$  (mittel) –  $r = +0,36$
- zwischen den Aufwandswerten für das Ein- und Ausschalen (Flachdecken auf rechteckigen Stützen gelagert) für die Grundrissklassen  $K_0$  (einfach) und  $K_2$  (kompliziert) –  $r = +0,63$
- zwischen den Aufwandswerten für das Ein- und Ausschalen (Flachdecken auf rechteckigen Stützen gelagert) für die Grundrissklassen  $K_1$  (mittel) und  $K_2$  (kompliziert) –  $r = +0,44$
- zwischen den Aufwandswerten für Flachdecken auf rechteckigen Stützen gelagert und den Aufwandswerten für Flachdecken auf runden Stützen gelagert ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von  $r = +0,90$
- Es konnte kein allgemein gültiger positiver Zusammenhang zwischen dem Aufwandswert für das Bewehren und dem Bewehrungsgrad nachgewiesen werden.
- Für den Zusammenhang zwischen dem Aufwandswert für das Schalen und dem Aufwandswert für das Bewehren wurden Korrelationskoeffizienten von ca. +0,89 bei Stabstahl und von ca. +0,86 bei Mattenstahl – unabhängig von der Form des Grundrisses – ermittelt.

<sup>241</sup> Vgl. Gleißner (2011). Grundlagen des Risikomanagements im Unternehmen – Controlling, Unternehmensstrategie und wertorientiertes Management. S. 165

<sup>242</sup> Vgl. Sander (2012). Probabilistische Risiko-Analyse für Bauprojekte. S. 133

<sup>243</sup> Vgl. Sander (2012). Probabilistische Risiko-Analyse für Bauprojekte. S. 113

<sup>244</sup> Vgl. Sander (2012). Probabilistische Risiko-Analyse für Bauprojekte. S. 115ff

<sup>245</sup> Vgl. Krempel (2012). Korrelationen bei Aufwandswerten für Schal- und Bewehrungsarbeiten. S. 137f

Weiters wurden Überlegungen zu den Zusammenhängen zwischen den Eingangsparametern bei der Grobkalkulation der Stahlbetonarbeiten durchgeführt und tabellarisch dargestellt. Aufgrund von theoretischen Überlegungen werden häufig positive Korrelationen zwischen den Inputs vermutet.<sup>246</sup>

#### 5.12.18 Mayer

Mayer stellt in seiner Dissertation auch Überlegungen zu Korrelationen zwischen verschiedenen Variablen an. Speziell wird dabei auf den Zusammenhang zwischen dem Basiseinheitspreis, der Menge und dem Zuschlagsfaktor eingegangen. Dabei wird angeführt, dass für jede der möglichen Korrelationen der 3 x 3 Matrix von Unabhängigkeit auszugehen ist. Nur für die Abhängigkeit zwischen Menge und Einheitspreis könnte eine negative Korrelation vorherrschen. Da dadurch jedoch das Risiko extremer Abweichungen reduziert wird, werden negative Korrelationen nicht berücksichtigt.<sup>247</sup>

Für alle weiteren Abhängigkeiten setzt Mayer in seinen Simulationen entweder einen Wert von 0 oder +1 an. Negative Korrelationen werden grundsätzlich außer Acht gelassen, da sie zu einem Kostenausgleich führen.<sup>248</sup>

Ob negative Korrelationen eine Vergrößerung oder Verkleinerung der Streuung der Ergebnisse verursachen, hängt wesentlich von den durchzuführenden Rechenoperationen ab. Es sei an dieser Stelle auf Abschnitt 5.11 verwiesen, in dem festgehalten wurde, dass bei Subtraktionen und Divisionen die Streuung der Ergebnisse steigt, je weiter sich der Korrelationskoeffizient dem Wert -1 nähert.

#### 5.12.19 Schach/Flemming

Ergebnisse einer Simulation können nur dann repräsentative Prognosen ergeben, wenn die simulierten Szenarien ein möglichst genaues Abbild der Realität darstellen. Schach/Flemming verweisen dabei auf die Notwendigkeit, Abhängigkeiten zwischen Mengenansätzen in Simulationsmodellen zu berücksichtigen. Als Beispiel wird der Zusammenhang zwischen Beton- und Bewehrungsmenge angegeben, bei dem mit steigendem Betonbedarf nicht eine Verringerung des Bewehrungsanteils einhergehen darf. Damit wird für diesen Zusammenhang eine positive Korrelation angegeben. Für die praktische Anwendung wird empfohlen, die Korrelationen in Gruppen einzuteilen und die Mittelwerte der Gruppen als konkrete Korrelationskoeffizienten anzusetzen. Die Gruppeneinteilung entspricht exakt jener, die auch von Chau vorgeschlagen wurde (siehe Tab. 5-18; Seite 200).<sup>249</sup>

#### 5.12.20 Zusammenfassung der Literaturansätze für Korrelationen

Die in den vorhergehenden Abschnitten angeführten ausgewählten Literaturansätze zu Korrelationen werden in Tab. 5-20 einander gegenübergestellt, sofern Angaben zur Art bzw. zur Höhe möglicher Korrelationskoeffizienten

<sup>246</sup> Vgl. Krempl (2012). Korrelationen bei Aufwandswerten für Schal- und Bewehrungsarbeiten. S. 76ff

<sup>247</sup> Vgl. Mayer (2013). Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung – Entwicklung eines Kosten-Prognose-Modells für Bauwerkskosten im Hochbau. S. 186f

<sup>248</sup> Vgl. Mayer (2013). Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung – Entwicklung eines Kosten-Prognose-Modells für Bauwerkskosten im Hochbau. S. 186

<sup>249</sup> Vgl. Schach/Flemming (2014). Grundlagen der Kostensimulation unter Einbeziehung von Risiken. S. 284f



identifiziert werden konnten. Unterscheidungskriterien sind:

- Art der Korrelation
  - positiv
  - negativ
  - unabhängig
- wertmäßige Angabe von Korrelationskoeffizienten (als Einzelwert oder als Bandbreite)
- Erhebungsmethode
  - theoretische Überlegungen
  - historische bzw. erhobene Daten
  - Befragungen
- Angaben zur Bedeutung von Korrelationen

Häufig werden von den Autoren positive Korrelationen angegeben, obwohl die tatsächliche Anwendung in Simulationen meist mit dem Argument des großen Aufwands bei der Modellierung und wertmäßigen Beurteilung der Korrelationskoeffizienten nicht stattfindet. Von einigen Autoren werden negative Korrelationen generell vernachlässigt.

Die Einbeziehung von Korrelationen hat sich im Laufe der Zeit durch den Einsatz von Simulationstechniken gegenüber analytischen Berechnungen (Faltung) wesentlich vereinfacht. Es wird von einigen Autoren die Bedeutung von Korrelationen auf die Outputwerte hervorgehoben. Konkrete, allgemein gültige Angaben von Korrelationskoeffizienten werden aber nur vereinzelt angeführt. Häufig werden nur Angaben zur Art der Korrelationen (positiv, negativ, unabhängig) getätigt.

Teilweise werden Korrelationsmatrizen aus historischen Daten abgeschlossener Projekte oder auf Basis von ExpertInnenbefragungen ermittelt. Wesentlich beim Ansatz von Korrelationskoeffizienten sind auch theoretische Überlegungen mit denen ermittelte Abhängigkeiten verifiziert werden können.

Generell sollte man sich bei der Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen und bei der Interpretation von Simulationsergebnissen des Einflusses von Korrelationen bewusst sein. Bei Outputs, die besonders hinsichtlich möglicher Spannweiten oder möglicher maximaler und minimaler Werte beurteilt werden sollen, ist eine vertiefte Auseinandersetzung und Erhebung von Korrelationskoeffizienten besonders wichtig. Für Sensitivitätsanalysen können auch Bandbreitenuntersuchungen für unterschiedliche Korrelationskoeffizienten durchgeführt werden. Simulationsergebnisse mit unabhängigen Variablen können dabei Ergebnissen, denen besonders viele negative bzw. besonders viele positive Korrelationen zugrunde liegen, gegenübergestellt werden.

Lfd. Nr.	Autor	Anwendungsbereich	Parameter zwischen denen eine Korrelation vermutet wird		Korrelation				Erhebungsmethode				Bedeutung von Korrelationen
					m positiv	n negativ	o unabhängig	konkrete Angabe von Korrelationskoeffizienten	theoretische Überlegungen	historische bzw. erhobene Daten	x Befragung		
0	A	B	C	D				H	I	J	K	L	
1	Hruschka (1968)	Baublaufplanung und Kalkulation	Aufwandwert Betonieren	Schalungsgrad	X								
2			Gesamt-Aufwandwert Stahlbetonarbeiten	Schalungsgrad	X					X			
3			Lehnstunden je m³ umbauter Raum	Baustoffgewicht je m³ umbauter Raum	X						X		
4	Schulz (1980)	Kalkulation	Wirtschaftsvorgänge		X				X			theoretisch von großer Bedeutung	
5	Lederer (1982)	Netzplantechnik	Volumen	Vorgangsdauern	X				X			große Bedeutung	
6			Volumen	Vorgangsleistungen	X				X				
7			Baufortschritt	Produktionsapparat	X				X				
8	Liberda (1985)	Kalkulation	Bruttomittellohn	Arbeitsaufwand		X		-0,95	X			Korrelationen können durch Entscheidungen ausgeschlossen werden	
9			Arbeitsaufwand	Stoffverbrauch					X				
10			Stoffkosten	Stoffverbrauch						X			
11			Aufwandswerte		X				X				
12	Touran/Wiser (1992)	Kalkulation	konkrete Korrelationsmatrix für Kostenkomponenten – 12 x 12 Matrix		X	X		zwischen -0,31 und +0,75		X		bedeutend für die Vorhersage der Varianz von Kosten	
13			konkrete Korrelationsmatrix für Kostenkomponenten – 6 x 6 Matrix		X			zwischen +0,28 und +0,75		X			
14	Chau (1995)	Kalkulation	konkrete Korrelationsmatrix für Kostenkomponenten – 19 x 19 Matrix		X	X		zwischen -0,81 und +0,95		X		unabhängige Eingangsparameter verfälschen die Simulationsergebnisse	
15			konkrete Korrelationsmatrix für Kostenkomponenten (Elektroinstallationen) – 10 x 10 Matrix		X	X		zwischen -0,79 und +0,89		X			
16	Link (1999)	Kalkulation und Risikomanagement	Inflation	Energiekosten	X				X			durch Berücksichtigung von Korrelationen ist eine beträchtliche Steigerung der Vorhersagegenauigkeit möglich	
17			Produktpreis	Verkaufszahlen		X			X				
18			Eintritt von Schlechtwetter	Terminverschiebung	X					X			
19			Dokumentationsaufwand	Risiko von Auseinandersetzungen bei der Abrechnung und Übernahme		X				X			
20	Yang (2005)	Kalkulation	konkrete Korrelationsmatrix für Kostenkomponenten – 8 x 8 Matrix		X		X	zwischen +0,10 und +0,64	X	X		Einfluss sowohl auf die Streuung als auch auf den Mittelwert des Outputs	
21		Unternehmensrisikomanagement	Risiken innerhalb des Projekts aus den Management- und Supportprozessen, z.B. Finanzierung, IT und Personal		X			möglich: 0,00 bis +1,00 wahrscheinlich: +0,50 bis +1,00	X			Korrelationen beeinflussen generell die Streuung um den Erwartungswert und haben im Zuge der Risikoaggregation Einfluss auf die Höhe der Risikozuschläge.  Als praktikabler Ansatz wird Unabhängigkeit zwischen Einzelrisiken und Projekten angenommen.	
22			Interne Einflussfaktoren		Risiken aus der projektspezifischen Bauverfahrenstechnik und den verarbeiteten Materialien und Bauprodukten		X			wahrscheinlich: 0,00 bis +1,00	X		
23	Girmscheid/Busch (2008)	Unternehmensrisikomanagement	Projektspezifische Risiken aufgrund des Unikalcharakters der Projekte, z.B. in Bezug auf Bauherr und weitere externe Projektbeteiligte (z.B. Architekt, Fachplaner, Subunternehmer), geologische und örtliche Verhältnisse etc.		X			wahrscheinlich: 0,00 bis +1,00	X				
24			Externe Einflussfaktoren		Nachfragerisiken aufgrund der regionalen Verteilung der Projekte		X	X		möglich: -1,00 bis +1,00 wahrscheinlich: -0,50 bis +1,00	X		
25	Sander (2012)	Risikomanagement und Kalkulation	Detailbewertung von Risiken		X			+1,00	X			Einsatz von Korrelationen soll das Ergebnis verbessern, ohne dabei den Anwender zu überfordern	
26	Krempf (2012)	Kalkulation – Schalungs- und Bewehrungsarbeiten für Decken	Aufwandwert Schalen – einfache Grundrissklasse	Aufwandwert Schalen – mittlere Grundrissklasse	X			+0,36			X		
27			Aufwandwert Schalen – einfache Grundrissklasse	Aufwandwert Schalen – komplizierte Grundrissklasse	X				+0,63			X	
28			Aufwandwert Schalen – mittlere Grundrissklasse	Aufwandwert Schalen – komplizierte Grundrissklasse	X				+0,44				X
29			Aufwandwert Schalen – Decke auf rechteckigen Stützen	Aufwandwert Schalen – Decke auf runden Stützen	X				+0,90				X
30			Aufwandwert Bewehren	Bewehrungsgrad				kein allgemein positiver Zusammenhang nachweisbar					X
31			Aufwandwert Schalen	Bewehren – Stabstahl	X				+0,89				X
32			Aufwandwert Schalen	Bewehren – Mattenstahl	X				+0,86				X
33	Mayer (2013)	Kalkulation	Basiseinheitspreis	Zuschlagsfaktor		X	X		Wechselbeziehung ist auszuschließen, negative Korrelation aber denkbar	X		negative Korrelationen werden aufgrund der Verringerung der Streuung völlig außer Acht gelassen	
34			Zuschlagsfaktor	Menge			X			X			
35			Basiseinheitspreis	Menge			X			X			
36	Schach/Flemming (2014)	Risikomodellierung	Betormenge	Bewehrungsmenge	X				X			Die Modellierung von Abhängigkeiten ist eine Notwendigkeit, um ein möglichst genaues Abbild der Realität darstellen zu können	

Tab. 5-20 Vergleich ausgewählter Literaturansätze zu Korrelationen

Aus der Literaturanalyse ist beim Risikomanagement und in der Kalkulation eine Tendenz zu positiven Korrelationen erkennbar. Eine pauschale Aussage ist jedoch nicht möglich und muss gesondert untersucht werden. Können Abhängigkeiten im Berechnungsmodell direkt abgebildet werden, ist der Ansatz von Korrelationen für die betroffenen Parameter nicht erforderlich.

## 5.13 Zusammenfassung

Nachfolgend wird auf die Problematik deterministischer Berechnungen im Vergleich zu den Ergebnissen einer Monte-Carlo-Simulation sowie auf die Vor- und Nachteile dieser eingegangen. Weiters wird die Interpretation von Simulationsergebnissen näher beleuchtet.

### 5.13.1 Kritik an deterministischen Berechnungen

In der Praxis sind deterministische Berechnungen im Hinblick auf Baukosten- und Bauzeitermittlungen die Regel. Probabilistische Verfahren werden in der Praxis nur selten eingesetzt und sind vielen der Verantwortlichen nur wenig bis gar nicht bekannt.<sup>250</sup>

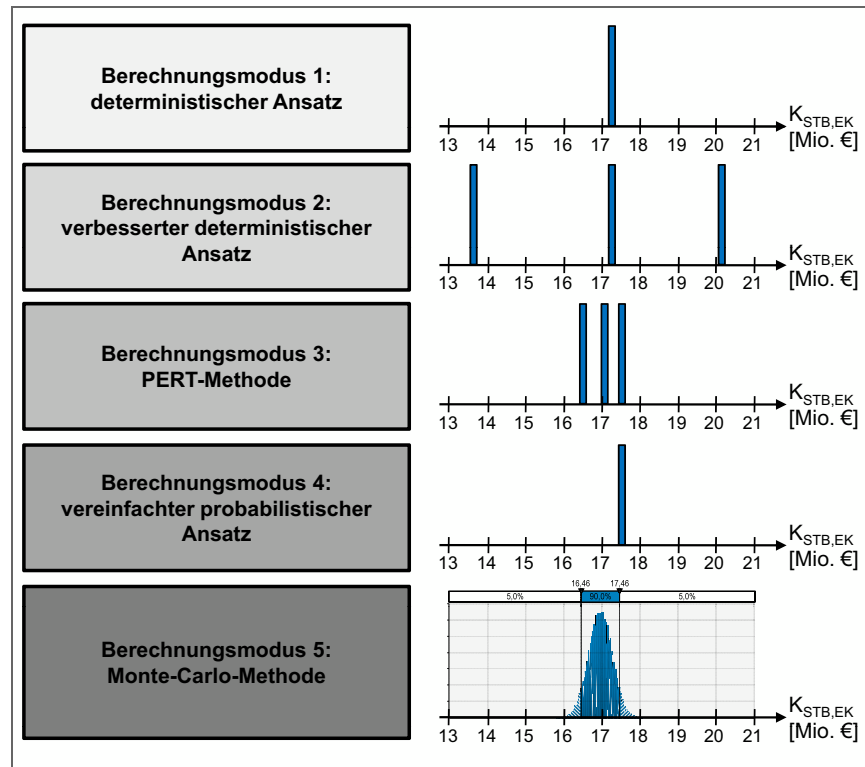
Deterministische Berechnungen beruhen meist auf sehr unsicheren Eingangsparametern, die oft nur über Schätzungen zu ermitteln sind. Eine systematische Berücksichtigung dieser Unsicherheiten erfolgt bei deterministischen Berechnungsverfahren bestenfalls durch Zuschläge oder Puffer. Eine Quantifizierung von eingegangenen Risiken und erzielbaren Chancen ist damit nicht möglich.

Das Problem deterministischer Berechnungen ist die geringe Aussagekraft der ermittelten Werte und der Informationsverlust bei der Anwendung einer solchen Methodik. Es kann von einem deterministischen Ergebnis (eine einzige Zahl – siehe Berechnungsmodus 1 in Abb. 5-44) nicht auf Wahrscheinlichkeiten geschlossen werden. Das Wissen über mögliche Bandbreiten der Eingangsparameter und deren Zusammenhänge geht durch eine deterministische Betrachtung ebenfalls verloren. Auch bei anderen Berechnungsmodi (verbesserter deterministischer Ansatz, PERT-Methode<sup>251</sup>, vereinfachter probabilistischer Ansatz) können keine Aussagen über Eintrittswahrscheinlichkeiten getroffen werden und es stehen immer nur einzelne Zahlen (im besten Fall drei Werte: Minimum, erwarteter Wert und Maximum) für die Darstellung möglicher Szenarien zur Verfügung. Ein Vergleich von fünf Berechnungsmodi zeigte, dass erst durch die Ergebnisse eines probabilistischen Berechnungsverfahrens (Monte-Carlo-Simulation) eine Einschätzung über die Ergebnisqualität der anderen Verfahren möglich wird (siehe Abb. 5-44).<sup>252</sup>

<sup>250</sup> Vgl. Alber (2013). Risikomanagement in Bauunternehmen – Eine Analyse von Theorie und Praxis. S. 165ff

<sup>251</sup> PERT steht für Program Evaluation and Review Technique

<sup>252</sup> Vgl. Kummer/Hofstadler (2013). Monte-Carlo-Simulation zur Berechnung von Baukosten. S. 183ff



**Abb. 5-44** Vergleich von fünf Berechnungsmodi – Ermittlung von Einzelkosten für die Stahlbetonarbeiten<sup>253</sup>

In der Fachliteratur wird diese Problematik schon seit vielen Jahren diskutiert und auch einige Kritik an deterministischen Berechnungsverfahren für die Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten geübt.

Schach gibt an, dass eine deterministische Ermittlung von Investitionskosten als problematisch anzusehen ist. Kostenüberschreitungen können bei deterministischen Betrachtungen nur vereinfacht z.B. mit Sensitivitätsanalysen oder Extremwertbetrachtungen hinsichtlich der Kosten untersucht werden. Mit Monte-Carlo-Simulationen werden solche Sensitivitäts- und Extremwertanalysen automatisch mitgeliefert. Schach empfiehlt dringend, dass die zu erwartenden Kosten künftig mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation ermittelt werden sollten.<sup>254</sup>

Die Forderung nach einer exakten Zahl steht lt. Schneider/Spiegel/Sander in direktem Widerspruch nach einer möglichst genauen Prognose. Der oft eingeschlagene Weg deterministischer Methoden führt zu Ergebnissen mit äußerst geringer Aussagekraft.<sup>255</sup>

Lederer führt in diesem Zusammenhang an, dass auch auf Auftraggeberseite für die Finanzplanung eine konkrete Zahl wenig hilfreich ist, da diese mit Sicherheit falsch ist. Es wird eine Angabe über die Zuverlässigkeit gefordert, da feste Zahlen alleine kein hinreichendes Instrument zur Beschreibung einer Prognose sind.<sup>256</sup>

<sup>253</sup> Kummer (2012). Einsatz der Monte-Carlo Simulation zur Berechnung von Baukosten und Bauzeit. S. 140

<sup>254</sup> Vgl. Schach (2005). Stochastische Investitionskostenberechnung für Verkehrsinfrastrukturprojekte. S. 124

<sup>255</sup> Sander/Spiegel/Schneider (2010). Die exakte Zahl – Gedanken zum Umgang mit Unschärfen. S. 606

Als Kritik an der Monte-Carlo-Simulation wird der höhere Aufwand bei der Eingabe und das erforderliche mathematische Verständnis für die Eingabe genannt. Ein solches Verständnis ist bei der Modellbildung, bei der Definition der Inputs sowie bei der Interpretation der Simulationsergebnisse in jedem Fall erforderlich.

### 5.13.2 Interpretation von Simulationsergebnissen

Die richtige Interpretation von Simulationsergebnissen ist entscheidend, um einen Mehrwert aus probabilistischen Berechnungen zu generieren. Die Ergebnisse einer Simulation werden im allgemeinen als Histogramme dargestellt, die entsprechend gelesen werden müssen, um die gewünschten Informationen erheben zu können. Weitere Darstellungsmöglichkeiten die zur Interpretation von Simulationsergebnissen herangezogen werden können, sind Empfindlichkeitsanalysen wie z.B. Tornado-, Punkt- und Spiderdiagramme.<sup>257</sup>

Was Histogramme sind, wurde bereits in Abschnitt 5.5.3 erörtert. Hier wird die Interpretation solcher Histogramme als Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen gezeigt. Im Softwareprogramm @Risk können sowohl Endergebnisse als auch Zwischenergebnisse als Outputs definiert und als Histogramme bzw. Summenkurven dargestellt werden (siehe Abb. 5-45).

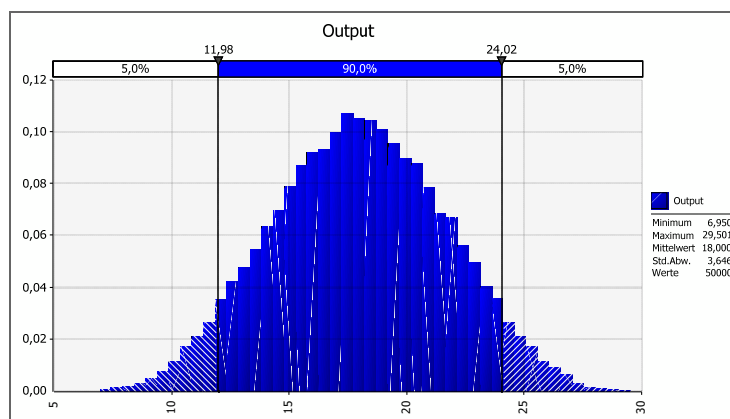


Abb. 5-45 Darstellung eines Outputs als Histogramm

Auf der Abszisse sind mögliche Merkmalsausprägungen des entsprechenden Outputs und auf der Ordinate die zugehörigen Häufigkeiten aufgetragen. Hier ist zu beachten, dass die Fläche unter den Histogrammen auf 1 normiert ist. Werden mehrere Histogramme mit unterschiedlichen Bandbreiten in einem Diagramm dargestellt, kann es daher zu unterschiedlichen Ausprägungen der Histogramme in vertikaler Richtung kommen.

Am oberen Bildrand sind sogenannte Gleitbegrenzer ersichtlich, die durch Schieberegler individuell auf gewünschte Werte der Abszisse oder auf jeweilige Wahrscheinlichkeiten eingestellt werden können. Mit Hilfe dieser Gleitbegrenzer können Aussagen über die Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit spezifischer Werte ermittelt werden.

<sup>256</sup> Vgl. Lederer (1982). Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung. S. 11f

<sup>257</sup> Vgl. Palisade Corporation (2013). Benutzerhandbuch – @Risk. S. 52ff

In der Legende am rechten Bildrand werden die Bezeichnung des betreffenden Outputs, einige statistische Kennwerte (standardmäßig: Minimum, Maximum, Mittelwert, Standardabweichung) sowie die Anzahl der dem Histogramm zugrunde liegenden Werte (entspricht der Anzahl an Iterationen, wenn für jede Iteration ein Wert ermittelt werden konnte, bzw. wenn kein Filter aktiviert wurde) angegeben.

Histogramme können auch in Summenkurven (siehe Abb. 5-46) übergeführt oder gemeinsam in einem Diagramm dargestellt werden. Die Summenkurve gibt mit ihrer Steigung die Häufigkeit in den entsprechenden Wertebereichen an. Je steiler der Verlauf der Summenkurve ist, desto größer ist auch die Wahrscheinlichkeit der Werte in diesen Bereichen.

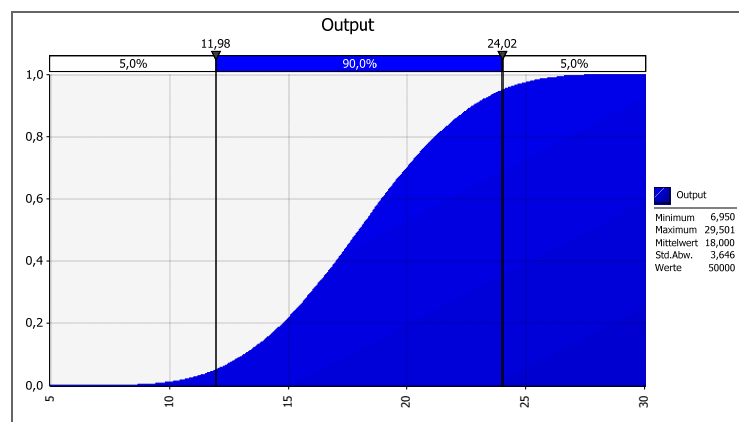


Abb. 5-46 Darstellung eines Outputs als Summenkurve

Für Entscheidungen müssen letztendlich einzelne Werte auf Basis eines Chancen-Risiko-Verhältnisses gewählt werden. Eine Möglichkeit für einen solchen Wert wäre z.B. der Median, der eine 50 %ige Überschreitungs- und auch eine 50 %ige Unterschreitungswahrscheinlichkeit aufweist. Hier wären die eingegangenen Risiken und Chancen gleich groß.

Im Zuge des harten Konkurrenzdrucks und der angespannten Wirtschaftslage in der Bauwirtschaft, sind Bauunternehmen oft gezwungen, höhere Risiken einzugehen. Als praxisgerechter Ansatz wird das Abrücken um die einfache Standardabweichung vom Mittelwert (je nach Fragestellung nach oben oder unten) angesehen. Zur Abschätzung des damit verbundenen Chancen-Risiko-Verhältnisses kann beispielhaft eine Normalverteilung herangezogen werden. Wird die einfache Standardabweichung vom Mittelwert abgezogen, ergibt sich eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von ca. 15,90 % und eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von ca. 84,10 % (siehe Abb. 5-47). Dieses Verhältnis dreht sich um, wenn die einfache Standardabweichung zum Mittelwert addiert wird.<sup>258</sup>

Die Abgrenzung bzw. Wahl des Chancen-Risiko-Verhältnisses stellt eine praxisorientierte Vorgehensweise und kein wahrscheinlichkeitstheoretisches Muss dar.

<sup>258</sup> Vgl. Hofstadler/Kummer (2015). Risiken und Chancen der Mischpreiskalkulation. S. 86ff

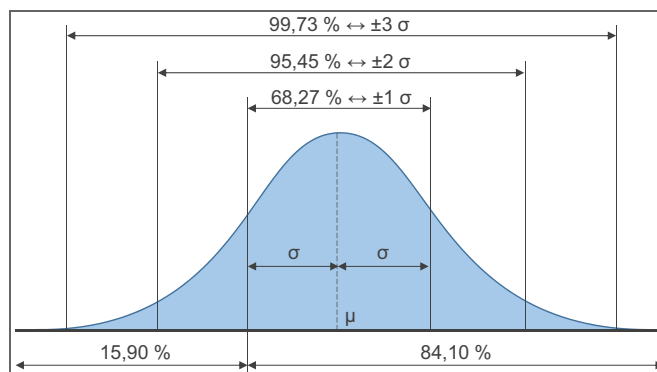


Abb. 5-47 Normalverteilung – Standardabweichung<sup>259</sup>

### 5.13.3 Vorteile von Monte-Carlo-Simulationen

Der Einsatz der Monte-Carlo-Simulation stellt sowohl für den AG als auch für den AN in den jeweiligen Projektphasen ein nützliches Werkzeug dar, um Entscheidungen vorzubereiten, Sensitivitätsanalysen und Optimierungen durchzuführen.

„Eine Aufgabenstellung ist immer simulationswürdig, wenn die Lösung eines Problems nur mit der Methode Simulation gefunden werden kann. Das ist etwa der Fall, wenn dynamische Prozesse oder stochastische Einflüsse eine nicht zu vernachlässigende Rolle in dem zu untersuchenden System spielen. Die Simulationswürdigkeit ist ebenfalls gegeben, wenn die Lösung mit anderen mathematischen Verfahren zwar möglich wäre, ein Simulationsmodell die Lösung aber wesentlich erleichtert. Sind besondere Anforderungen bezüglich Kommunikation und Visualisierung der Ergebnisse gestellt, so ist die Erstellung eines Simulationsmodells durchaus auch dann zu vertreten, wenn das zugrunde liegende Problem mit anderen Mitteln u. U. sogar einfacher und schneller zu lösen wäre.“<sup>260</sup>

Nachfolgend werden demonstrativ Vorteile der Monte-Carlo-Simulation gegenüber deterministischen Berechnungen aufgezählt:

- ExpertInnenwissen wird durch Monte-Carlo-Simulationen auf eine breitere Basis gestellt.
- Bandbreiten können systematisch berücksichtigt werden.
- Analytische Lösungen (mit Hilfe von Faltungen) sind nicht erforderlich, da mit Zufallszahlen operiert wird.
- Eine Vielzahl möglicher Szenarien kann im Zuge eines Simulationsdurchlaufs betrachtet werden.
- Best- und Worst-Case Szenarien werden bei Monte-Carlo-Simulationen automatisch mitabgebildet.
- Sensitivitätsanalysen sind Teil der Simulation, da unsichere Inputwerte zufällig innerhalb der vorgegebenen Bandbreiten in den Iterationsschritten berücksichtigt werden.

<sup>259</sup> Hofstadler/Kummer (2015). Risiken und Chancen der Mischpreiskalkulation. S. 87

<sup>260</sup> Wenzel et. al. (2008). Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik – Planung und Durchführung von Simulationsstudien. S. 15

- Zur Interpretation von Simulationsergebnissen können Empfindlichkeitsanalysen (z.B. Tornado-, Punkt- und Spiderdiagramme) herangezogen werden.
- Unsicherheiten einzelner Parameter können einfach in die Berechnungen integriert werden.
- Probabilistische Berechnungen können relativ einfach gegenüber analytischen Verfahren (Faltung) durchgeführt werden.
- Simulationsmodelle haben das Potential zur Durchführung probabilistischer Optimierungen (Operations Research).
- Rechenmodell bleibt gegenüber einer deterministischen Berechnung weitgehend unverändert.
- Abhängigkeiten können mit Hilfe von Korrelationen in die Berechnungen integriert werden.
- Historische Daten, eigene Aufzeichnungen und ExpertInnenwissen können zusammen mit theoretischen Überlegungen und Charakteristika in Verteilungsfunktionen übergeführt werden und damit in die Berechnungen einfließen.
- Deterministische und probabilistische Inputs können gemeinsam in einer Simulation angesetzt werden.
- Die Aussagekraft von Berechnungsergebnissen wird durch wahrscheinlichkeitstheoretische Informationen und statistische Kenngrößen erhöht.
- Ergebnisse können einfach in Form von Histogrammen grafisch dargestellt werden.
- Entscheidungen können auf Basis eines gewählten Chancen-Risiko-Verhältnisses gewählt werden.
- Überlegungen hinsichtlich unsicherer Parameter werden direkt in die Berechnungen integriert und sind auch im Nachhinein aus dem Simulationsmodell rekonstruierbar.
- Der unsystematischen Wahl von Eingangswerten wird durch den Ansatz von Verteilungsfunktionen begegnet.
- Bandbreiten von Eingangsparametern können aus der Natur (Datenerhebungen und/oder ExpertInnenbefragungen) abgeleitet werden.
- Kommerzielle Programme sind für die Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen verfügbar, vertiefte Programmierkenntnisse sind für die Anwendung daher nicht erforderlich.
- Werden Daten systematisch erhoben, ist eine Verknüpfung mit entsprechenden Datenbanken denkbar, um Verteilungsfunktionen zu fitten und die Ansätze damit zu präzisieren und zu aktualisieren.

#### 5.13.4 Nachteile von Monte-Carlo-Simulationen

Nachfolgend werden demonstrativ Nachteile der Monte-Carlo-Simulation gegenüber deterministischen Berechnungen aufgezählt:

- Vom Anwender ist ein gewisses mathematisches Verständnis sowohl bei der Eingabe als auch bei der Interpretation der Ergebnisse erforderlich.



- Es wird – sofern kein eigenes Programm entwickelt wird – eine kommerzielle Softwarelösung benötigt. Es handelt sich dabei meist um Add-Ins für MS Excel.
- Die Qualität der Ergebnisse hängt von der Qualität der Eingabe und des Berechnungsmodells ab („garbage in = garbage out“).
- Eingabe ist aufwändiger als bei einer deterministischen Berechnung.
- Subjektive Elemente der Berechnungen bleiben auch bei der Monte-Carlo-Simulation erhalten, werden jedoch durch Verteilungsfunktionen in die Berechnungen systematisch integriert.
- Ohne Darstellung und Beschreibung der verwendeten Inputwerte erscheinen Simulationsergebnisse als Produkt einer „Black Box“.



## 6 Empirische Datenerhebung

Die Gewinnung empirischer Daten kann je nach Zieldefinition, Gegenstand und Wissenschaftsfeld auf unterschiedliche Weise erfolgen. Häufig werden Interviews oder standardisierte Fragebögen verwendet. Dabei handelt es sich um eine Form der Primärdatenerhebung, bei der im Gegensatz zur Sekundärerhebung neues Datenmaterial generiert wird.

In diesem Kapitel wird das Vorgehen und die Auswertung einer empirischen Datenerhebung zum Thema der Unsicherheiten und Produktivitätsverluste bei Stahlbeton- (Ortbeton) und Mauerarbeiten – die an der TU Graz (Dipl.-Ing. Markus Kummer und Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler) zwischen Dezember 2014 und Oktober 2015 durchgeführt wurde – beschrieben. Die Primärerhebung erfolgte in Form einer ExpertInnenbefragung, bei der ein standardisierter schriftlicher Fragebogen eingesetzt wurde und die Antworten mit den Befragten noch zusätzlich mündlich erörtert wurden.

Nachfolgend werden die Ziele der Befragung, die Auswahl der ExpertInnen, die Fragebogengestaltung und Datenaufbereitung näher beschrieben sowie die Ergebnisse ausgewählter Fragen analysiert und präsentiert.

### 6.1 Ziel der ExpertInnenbefragung

Die ausgewählten ExpertInnen (AuftragnehmervorteilerInnen; tätig im Bereich Hochbau) wurden in einem Anschreiben sowie am Titelblatt des Fragebogens in die Problematik linearer Ansätze und deterministischer Inputwerte bei Baukosten- und Bauzeitermittlungen eingeführt.

Ziel der ExpertInnenbefragung war es, aktuelle Primärdaten zu folgenden Themenbereichen zu erheben und zu sichern:<sup>1</sup>

- Unsicherheiten bei Mengenangaben (Schalung, Bewehrung, Beton und Mauerwerk) getrennt für öffentliche und private Auftraggeber
- Unsicherheiten bei Aufwandswerten
- Gemeinsames Auftreten von Produktivitätsverlusten\*
- Zusammenhang zwischen vorgegebener Bauzeit und Herstellkosten\*
- Abhängigkeiten (Korrelationen) zwischen bestimmten Parametern\*
- Mischpreiskalkulation

Zur Steigerung der Qualität der erhobenen Daten wurden Kriterien für die Auswahl der ExpertInnen festgelegt und teilweise Vorbesprechungen zur Erhöhung des Verständnisses der Fragestellungen durchgeführt. Zusätzlich erfolgte nach einer Analyse der ausgefüllten Fragebögen mit jedem/jeder der ExpertInnen eine persönliche oder telefonische Fragebogenerörterung, bei

<sup>1</sup> Im Zuge dieser Arbeit wird nur auf die Auswertung ausgewählter Fragen (mit \* gekennzeichnet) eingegangen.

der evtl. aufgetretene Unklarheiten oder Verständnisprobleme ausgeräumt und wichtige Hintergrundinformationen erhoben werden konnten. Die ExpertInnen hatten im Laufe dieser mündlichen Erörterung auch die Möglichkeit, Angaben zu korrigieren oder Ergänzungen zu machen.

Die Angaben der Befragten wurden vertraulich behandelt und gehen anonymisiert und in ihrer Gesamtheit in die statistischen Auswertungen ein.

## 6.2 Auswahl der ExpertInnen

Die Befragung aller ExpertInnen auf einem Fachgebiet ist – außer bei einzelnen sehr spezifischen Disziplinen – nicht möglich. Es müssen daher Stichproben gezogen werden, um aufgrund der erhaltenen Antworten auf die Grundgesamtheit schließen zu können. Die Auswahl solcher ExpertInnen stützt sich auf Grundsatzfragen wie:<sup>2</sup>

- Wer verfügt über die relevanten Informationen?
- Wer von den InformantInnen ist verfügbar?
- Wer ist am ehesten bereit Informationen zu geben?
- Wer ist am ehesten in der Lage präzise Informationen zu geben?

Die Einteilung von ExpertInnen kann anhand des Reifegradmodells<sup>3</sup> erfolgen. Es wird dabei beurteilt, ob potentielle UmfrageteilnehmerInnen die notwendigen Fähigkeiten (bzw. das notwendige Wissen und die notwendige Berufserfahrung) und auch den nötigen Willen besitzen, um Fragen zu einem bestimmten Fachgebiet beantworten zu können (siehe Abb. 6-1). Es gilt vor allem fähige ExpertInnen für die Teilnahme an einer Befragung zu gewinnen (Reifegrad 3 und 4). Weiters muss darauf geachtet werden, dass die Umfrageergebnisse nicht durch ExpertInnen des Reifegrads 2 verfälscht werden.

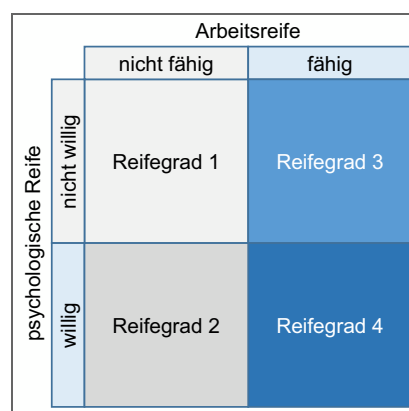


Abb. 6-1 Reifegradmodell

ExpertInnen sind in diesem Zusammenhang Personen, die in einem klar abgrenzbaren Feld über ein spezielles Wissen verfügen und für eine Umfrage als Quelle von Spezialwissen fungieren.<sup>4</sup>

<sup>2</sup> Vgl. Gorden (1969). Interviewing – Strategy, Techniques, and Tactics. S. 115ff

<sup>3</sup> Vgl. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/85846/theorie-des-reifegrades-v7.html>. Datum des Zugriffs: 22.10.2015

Sie verfügen demnach auf einem Fachgebiet über Kenntnisse und intellektuelle Fähigkeiten, die weit über dem Durchschnitt liegen. ExpertInnenwissen besteht in der Regel aus sehr großen Informationsmengen in Verbindung mit Vereinfachungen, wenig bekannten Fakten, Faustregeln und klugen Verfahrensweisen (Heuristiken), die eine effiziente Problemlösung (in diesem Gebiet) ermöglichen.<sup>5</sup>

Die Arbeitsreife wurde für die gegenständliche ExpertInnenbefragung durch den einschlägigen beruflichen Tätigkeitsbereich (Bauleitung/Projektleitung/Gruppenleitung, Kalkulation, Geschäftsführung etc. im Hochbau), Erfahrungen speziell in der Ausführung und Bewertung von Stahlbeton- und Mauerwerksarbeiten, den notwendigen Überblick über die abgefragten Aspekte sowie durch die vorhandene fachspezifische Berufserfahrung (mindestens 5 Jahre) definiert.

Bei der durchgeführten ExpertInnenbefragung wurden die TeilnehmerInnen darauf hingewiesen, nur jene Fragen zu beantworten, die sie aus ihrer Erfahrung auch tatsächlich beantworten können. Fragen, bei denen keine fundierte Antwort abgegeben werden konnte, wurden übersprungen bzw. nicht beantwortet. Um Verständnisprobleme bei der Beantwortung auszuräumen, wurde mit jedem der Fachleute eine mündliche Fragebogenerörterung durchgeführt, bei der die Antworten auch noch korrigiert und/oder ergänzt werden konnten. Damit wurde sichergestellt, dass die ExpertInnen präzise, richtige und sorgfältige Angaben machten.

Insgesamt wurden im Zuge einer Vorauswahl ca. 130 ExpertInnen, die Erfahrungen auf den Gebieten Kalkulation, Arbeitsvorbereitung, Bauausführung, Nachkalkulation und Abrechnung hatten, angeschrieben und um die Teilnahme an der Befragung gebeten. Diese Vorauswahl stellt nicht die Gesamtheit aller ExpertInnen in den genannten Fachbereichen dar. Es handelt sich dabei um Personen mit entsprechendem Fachwissen und ausreichender Berufserfahrung, die entweder durch persönliche Kontakte der Befragungsleiter oder durch die Vermittlung von Dritten in diesen „Pool“ an potentiell fähigen und willigen Personen aufgenommen wurden.

Insgesamt konnten 27 ExpertInnen<sup>6</sup> für die Umfrage gewonnen werden, wobei nicht jeder/jede auch alle Fragen beantworten konnte oder wollte. Die Anzahl der gültigen Antworten (n) wird bei den Auswertungen jeweils angegeben.

Der überwiegende Teil der Befragten (ca. 63 %) ist bei Großunternehmen<sup>7</sup> tätig, etwa 26 % arbeiten bei mittleren Unternehmen<sup>8</sup> und ca. 11 % sind Kleinunternehmen<sup>9</sup> zuzuordnen (siehe Abb. 6-2). MitarbeiterInnen von Kleinstunternehmen<sup>10</sup> waren keine Zielpersonen der Umfrage und wurden daher auch nicht zur Teilnahme eingeladen.

<sup>4</sup> Vgl. Gläser/Laudel (2010). Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen. S. 12ff

<sup>5</sup> Vgl. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55229/expertenwissen-v9.html>. Datum des Zugriffs: 20.10.2014

<sup>6</sup> aus Deutschland und Österreich

<sup>7</sup> Anzahl der MitarbeiterInnen: über 250

<sup>8</sup> Anzahl der MitarbeiterInnen: zwischen 50 und 249

<sup>9</sup> Anzahl der MitarbeiterInnen: zwischen 10 und 49

<sup>10</sup> Anzahl der MitarbeiterInnen: bis 9

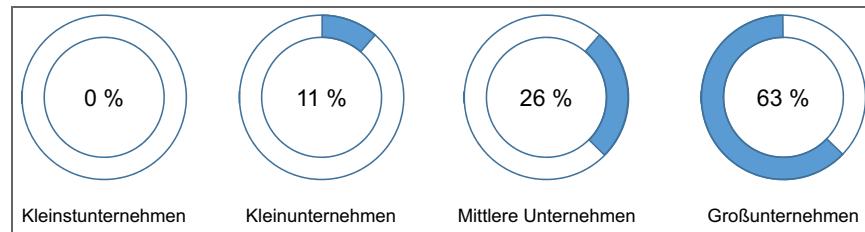


Abb. 6-2 Zuordnung der ExpertInnen im Hinblick auf die Unternehmensgröße (n = 27)

Für die Zuordnung der aktuellen Position der ExpertInnen in den Unternehmen wurden vier Gruppen gebildet:

- Bauleitung/Projektleitung/Gruppenleitung
- Kalkulation
- Technischer Innendienst/Vertragsmanagement
- Bereichsleitung/Geschäftsführung

Den größten Anteil der Befragten macht die Gruppe der „Bauleitung/Projektleitung/Gruppenleitung“ mit ca. 41 % aus (siehe Abb. 6-3), gefolgt von der Gruppe „Bereichsleitung/Geschäftsführung“ mit ca. 26 %. Auf die Gruppe der „Kalkulation“ bzw. Personen die im „Technischen Innendienst bzw. im Vertragsmanagement“ tätig sind, entfallen insgesamt ca. 34 %.<sup>11</sup>

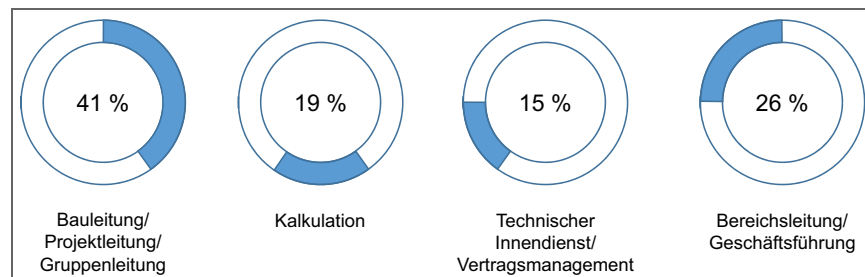


Abb. 6-3 Positionen der ExpertInnen zum Zeitpunkt der Befragung (n = 27)<sup>12</sup>

Wie bereits angeführt, stellt die Berufserfahrung bei der Auswahl der ExpertInnen ein wesentliches Kriterium dar. Nur mit entsprechender Erfahrung können solide Angaben zu Unsicherheiten und Bandbreiten sowie zum Auftreten von Produktivitätsverlusten und dem Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit bzw. zu Korrelationen getätigt werden.

Bei der gegenständlichen Befragung ergibt sich die durchschnittliche Berufserfahrung der ExpertInnen mit 17,7 Jahren. Die Bandbreite der angegebenen Berufserfahrung erstreckt sich von 5 bis 41 Jahre.

Wird die Berufserfahrung der ExpertInnen in Klassen zusammengefasst, ergibt sich eine Verteilung entsprechend Abb. 6-4. Es zeigt sich, dass jeweils ca. 30 % der ExpertInnen eine Berufserfahrung von weniger als 10 Jahren

<sup>11</sup> Die Angaben beziehen sich auf die aktuellen Positionen der TeilnehmerInnen und berücksichtigen nicht, in welchen Bereichen die Befragten insgesamt bereits gearbeitet haben. Die Mehrheit der ExpertInnen konnte im Zuge ihres Berufslebens bereits Erfahrungen in mehreren Bereichen sammeln.

<sup>12</sup> Die Summe der angeführten Prozentwerte entspricht aufgrund von Rundungsfehlern nicht exakt 100 %.

bzw. zwischen 20 und 30 Jahren aufweisen. Etwa ein Drittel der Befragten hat zwischen 10 und 20 Jahren Erfahrung. Zwei der TeilnehmerInnen weisen eine Berufserfahrung von 30 Jahren oder mehr auf.

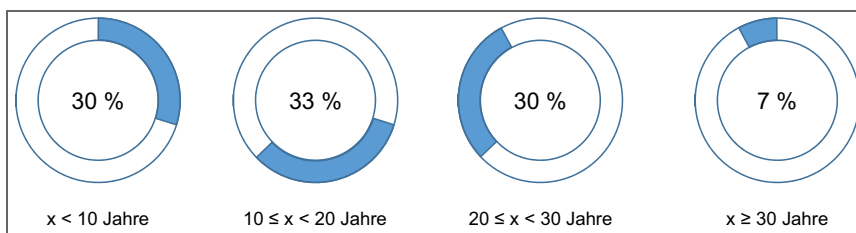


Abb. 6-4 Berufserfahrung der ExpertInnen (n = 27)

### 6.3 Fragebogengestaltung

Für die Fragebogengestaltung wurden zunächst Fragen gesammelt und mittels ABC-Analyse jene ausgewählt, die für die Beantwortung der Forschungsfragen von besonderem Interesse sind.

Die Fragengestaltung erfolgte nach den Prinzipien der Einfachheit, Verständlichkeit, Neutralität sowie Eindeutigkeit und wurde zusammen mit Sozialforschern (Soziologen) in mehreren Überarbeitungsschritten entwickelt. Der fertige Fragebogen wurde anhand von Pretests mit Fachleuten auf dem Gebiet des Baubetriebs und der Bauwirtschaft auf seine Tauglichkeit und Verständlichkeit hin untersucht und weiterentwickelt. Bereits während der Fragebogenentwicklung stand die Auswertung der zukünftig erhobenen Daten im Mittelpunkt und beeinflusste die Fragebogengestaltung erheblich. Hauptsächlich wurden quantitative Fragen, bei denen Prozentwerte abgefragt wurden, sowie geschlossene Fragen mit vorgegebenen Antwortmöglichkeiten (durch ankreuzen) gestellt. Diese wurden durch einige offene Fragen, bei denen die ExpertInnen ihre Meinung schriftlich äußern konnten, ergänzt.

Insgesamt wurde darauf geachtet, dass die Beantwortung des Fragebogens nicht mehr als ca. eine Stunde in Anspruch nimmt, um als Resonanz möglichst vollständig ausgefüllte Fragebögen zu erhalten.

Der Fragebogen wurde in Papierform bzw. als PDF an die ExpertInnen verschickt und von diesen handschriftlich ausgefüllt. Es wurde bewusst Abstand von einer Onlinebefragung genommen, da bei einer Frage auch ein Kurvenverlauf für den Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit eingezeichnet werden musste und Notizen, Anmerkungen und Nebenrechnungen direkt am Fragebogen festgehalten werden konnten.

Nachteilig bei einem Fragebogen in Papierform ist, dass die ExpertInnen diesen gegebenenfalls selbst ausdrucken und dann auch wieder einscannen müssen (sofern dieser per E-Mail zurückgeschickt wird). Weiters müssen die Antworten händisch digitalisiert werden, um weitere Auswertungen vornehmen zu können.

## 6.4 Durchführung der Befragung

Die Befragung wurde im Zeitraum zwischen Dezember 2014 und Oktober 2015 durchgeführt. Insgesamt wurden ca. 130 ExpertInnen zur Teilnahme an der Befragung eingeladen, wobei die Rücklaufquote bei ca. 21 % lag. Insgesamt konnten für die Auswertung 27 ausgefüllte Fragebögen herangezogen werden.

Nach einer ersten Kontaktaufnahme und der Bereitschaftserklärung an der Befragung teilzunehmen, wurde der Fragebogen an die TeilnehmerInnen verschickt.

Die ExpertInnen füllten den Fragebogen selbständig aus, hatten aber bei Unklarheiten oder Verständnisproblemen die Möglichkeit, Rücksprache mit den Leitern der Befragung zu halten.

Nachdem die Fragebögen ausgefüllt zurückgeschickt wurden, erfolgte eine Prüfung auf Plausibilität und Vollständigkeit der Antworten. In einem nächsten Schritt wurden mit den Befragten Termine für persönliche oder telefonische Fragebogenerörterungen vereinbart. Durch die Terminvorschläge der ExpertInnen konnte sichergestellt werden, dass diese einerseits genügend Zeit für eine ausführliche Besprechung hatten, andererseits hatten die TeilnehmerInnen zumeist den Fragebogen direkt vor sich liegen und konnten so ihre Antworten leichter reflektieren und gegebenenfalls ergänzen oder korrigieren. Im Mittel wurde mit jedem/jeder der Befragten eine ca. 45 minütige persönliche oder telefonische Fragebogenerörterung durchgeführt.

## 6.5 Beschreibung der Auswertungsverfahren

Die grafische Auswertung der Umfrageergebnisse wurde mit MS Excel bzw. mit R unter Verwendung einiger Programmpakete („packages“) durchgeführt.<sup>13</sup> Die deskriptive Datenauswertung wurde ebenfalls in R durchgeführt und die Ergebnisse, aus Gründen der einheitlichen Darstellung der Tabellen in dieser Arbeit, in Excel importiert.

### 6.5.1 Deskriptive Auswertung

Die deskriptive Auswertung der Umfrageergebnisse wird in den entsprechenden Abschnitten jeweils als Tabelle angeführt. Beispielhaft sind in Tab. 6-1 die ersten beiden Spalten dieser Auswertungstabellen dargestellt. Ganz links in der Tabelle ist die Zeilennummerierung (Lfd.Nr.) angegeben. In Zeile eins ist die Anzahl der gültigen Antworten (n) für die jeweilige Frage bzw. den entsprechenden Parameter angeführt. Basierend auf den angegebenen Antworten ist in den Zeilen zwei und vier der (arithmetische) Mittelwert sowie die Standardabweichung eingetragen. Zeile drei gibt den Standardfehler des Mittelwerts  $s(\bar{x})$  wieder. Dieser berechnet sich aus der Division der Standardabweichung s durch die Wurzel der Anzahl an Nennungen n:<sup>14</sup>

<sup>13</sup> Die Programmpakete sind im Literaturverzeichnis angeführt und werden nicht gesondert beschrieben. Erläuterungen und Beispiele zu den „Packages“ sind den Dokumentationen, die im Internet frei zugänglich sind, zu entnehmen.

<sup>14</sup> Vgl. z.B. Sachs /Hedderich (2006). Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R. S. 266



$$s(\bar{X}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6-1)$$

Der Variationskoeffizient VarK ist ein Maß der Streuung, der in Prozent angegeben und aus der Division der Standardabweichung durch den Mittelwert ermittelt wird:<sup>15</sup>

$$\text{VarK} = \frac{s}{\bar{x}} \quad (6-2)$$

Der Median ist Zeile sechs und der MAD (Median der absoluten Abweichungen) Zeile sieben zu entnehmen. Für die Ermittlung des MAD werden zunächst der Betrag der absoluten Abweichungen jeder Antwort vom Median der Grunddaten ermittelt. Der zentrale Wert (also der Median) der berechneten absoluten Abweichungen entspricht dem MAD.

Lfd. Nr.	Parameter
0	A
1	n
2	Mittelwert
3	Standardfehler des MW
4	Standardabweichung
5	Variationskoeffizient
6	Median
7	MAD
8	robuster Variationskoeffizient (basierend auf Median)
9	Modus
10	Minimum
11	Maximum
12	Spannweite
13	Schiefe
14	M-Schätzer (H12 (80 %))
15	Standardabweichung (H12 (80 %))
16	robuster Variationskoeffizient (basierend auf M-Schätzer)
17	Normalverteilung (Shapiro-Wilk, $p < 0,05$ )

Tab. 6-1 Parameter der deskriptiven Datenauswertung

Der robuste Variationskoeffizient basierend auf dem Median ist in Zeile acht in Prozent angegeben und ergibt sich aus der Division des MAD durch den Median.

Um aus den erhobenen Daten einen robusten Schätzer für die Standardabweichung zu ermitteln, wird in der Literatur empfohlen, den MAD mit einem Faktor von 1,4826 zu multiplizieren.<sup>16</sup>

Der häufigste Wert, der Modus, ist neben dem Minimum (Zeile 10) und dem Maximum (Zeile 11) in Zeile neun enthalten. Die Spannweite (Zeile 12) ergibt sich aus der Differenz des Maximums und des Minimums.

Weisen die Antworten der ExpertInnen einen multimodalen Verlauf auf, ist dies aus den grafischen Auswertungen (Balkendiagramme oder Violinplots) ersichtlich. In den Tabellen der deskriptiven Auswertungen wird in einem solchen Fall jener Modus angegeben, der näher beim M-Schätzer liegt.

<sup>15</sup> Vgl. z.B. Sachs/Hedderich (2006). Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R. S. 72f

<sup>16</sup> Vorausgesetzt wird dabei eine Normalverteilung der Daten.

Siehe dazu z.B.:

- Analytical Methods Committee (2001). Robust statistics: a method of coping with outliers – amc technical brief. S. 2

- Huber/Ronchetti (2009). Robust Statistics. S. 106ff

- Daszykowski et al. (2007). Robust statistics in data analysis – A review Basic concepts. S. 205

Die Schiefe  $v$  [-] errechnet sich nach Glg. (6-3) und wird in Zeile 13 angeführt.<sup>17</sup> Die eingetragenen Werte der Schiefe sind standardisiert und damit einheitslos. Ist die Schiefe größer null, handelt es sich um eine rechts-schiefe Verteilung. Ist der Wert kleiner null, liegt eine linksschiefe Verteilung vor. Bei  $v = 0$  handelt es sich um eine symmetrische Verteilung.

$$v = \frac{n}{(n-1) \cdot (n-2)} \cdot \sum \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad (6-3)$$

Der Umgang mit Ausreißern muss bei der Mittelwertbildung gesondert betrachtet werden, da das arithmetische Mittel besonders anfällig für Ausreißer ist. Es ist zu untersuchen, ob es sich bei den Ausreißern um Erhebungs- oder Eingabefehler aufgrund von z.B. Verständnisproblemen oder Fehlinterpretationen handelt. Kann dies ausgeschlossen werden, gibt es die Möglichkeit sogenannte robuste Schätzer an Stelle des sensiblen arithmetischen Mittelwerts heranzuziehen, um Ausreißer dennoch in der Auswertung Berücksichtigung zu können. Die M-Schätzer-Methode nach Huber hat sich in diesem Zusammenhang als nützliches Werkzeug erwiesen.<sup>18</sup> Die Ausreißer werden bei dieser Methode nicht aus der Erhebung eliminiert, sondern fließen mit geringerem Gewicht in die Berechnung des Mittelwertschätzers ein. Dies bietet vor allem bei einer geringen Anzahl an erhobenen Werten den Vorteil, dass alle ExpertInnenmeinungen in der Auswertung berücksichtigt werden können. Die M-Schätzer wurden mit R (Package: „MASS“) berechnet.

Der M-Schätzer sowie die Standardabweichung des M-Schätzers werden unter Angabe des voll gewichteten Bereichs bei der Mittelwertbildung (Prozentangabe) in den Zeilen 14 und 15 angeführt. Der robuste Variationskoeffizient auf Basis des M-Schätzers ergibt sich aus der Division der Standardabweichung des M-Schätzers durch den M-Schätzer selbst und wird in Zeile 16 angeführt.

Eingangswerte für die Berechnung des M-Schätzers bzw. der Standardabweichung des M-Schätzers sind die quantitativen Antworten der ExpertInnen  $x_i$  sowie der daraus gebildete Median  $\tilde{x}_0$  und der MAD. Der MAD wird für die weiteren Berechnungen mit dem Faktor 1,4826 multipliziert und stellt einen robusten Schätzer der Standardabweichung  $\sigma_0$  dar.<sup>19</sup> In einem nächsten Schritt werden Grenzwerte definiert, auf deren Unter- oder Überschreitung die ursprünglichen Daten der ExpertInnen geprüft und gegebenenfalls zu  $\hat{x}_i$  transformiert werden.<sup>20</sup> Die definierten Grenzen sind einmal der Median, erhöht um  $k \cdot \sigma_0$  bzw. der Median, reduziert um  $k \cdot \sigma_0$  (siehe Glg. (6-4)). Der Faktor  $k$  stellt dabei die Tuningkonstante nach Huber dar.<sup>21</sup> Je nachdem, ob die definierten Grenzwerte über- oder unterschritten werden, gelten für die transformierten Daten  $\hat{x}_i$  folgende Bedingungen:<sup>22</sup>

<sup>17</sup> Vgl. z.B. Lohninger (2012). [http://www.statistics4u.info/fundstat\\_germ/cc\\_skewness.html](http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/cc_skewness.html). Datum des Zugriffs: 07.10.2015

<sup>18</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 104ff

Basis für diesen Faktor bildet die Annahme, dass die Daten normalverteilt sind.

<sup>20</sup> Bei dieser Transformation spricht man auch von einer „Winsorisierung“ („winsorisation“). Vgl. Analytical Methods Committee (2001). Robust statistics: a method of coping with outliers – amc technical brief. S. 2

<sup>21</sup>  $k$  kann dabei Werte zwischen 0 und  $+\infty$  annehmen und wird subjektiv angesetzt. Bei einem Wert von  $k = 0$  entspricht der M-Schätzer dem Median. Bei  $k = +\infty$  ergibt sich für den M-Schätzer der Mittelwert. Für die Auswertungen in dieser Arbeit wird  $k$  mit 1,282 angesetzt. Damit werden ca. 80 % der Antworten voll gewichtet.

<sup>22</sup> Vgl. Analytical Methods Committee (2001). Robust statistics: a method of coping with outliers – amc technical brief. S. 2 und Thompson (2007). Statistics and Data Analysis in Proficiency Testing. (Online unter: [http://www.rsc.org/images/madrid%202007\\_tcm18-87000.pdf](http://www.rsc.org/images/madrid%202007_tcm18-87000.pdf). Datum des Zugriffs: 07.10.2015)

$$\hat{x}_i = \begin{cases} x_i & \text{wenn: } \tilde{x}_0 - k \cdot \sigma_0 \leq x_i \leq \tilde{x}_0 + k \cdot \sigma_0 \\ \tilde{x}_0 - k \cdot \sigma_0 & \text{wenn: } x_i < \tilde{x}_0 - k \cdot \sigma_0 \\ \tilde{x}_0 + k \cdot \sigma_0 & \text{wenn: } x_i > \tilde{x}_0 + k \cdot \sigma_0 \end{cases} \quad (6-4)$$

Der aus den transformierten Daten berechnete Mittelwert bzw. die entsprechende Standardabweichung stellen den M-Schätzer bzw. die Standardabweichung des M-Schätzers in erster Näherung dar. Die gezeigte Vorgehensweise wird für die transformierten Daten wiederholt. Es ergibt sich dabei eine stufenweise iterative Berechnung, die sich einem konstanten Wert annähert.

Für die Ermittlung der M-Schätzer wird in dieser Arbeit das R-Package „MASS“ mit der Funktion „hubers“ angewendet.<sup>23</sup>

In der letzten Zeile der Auswertungstabellen wird jeweils angegeben, ob die Antworten auf Basis eines Shapiro-Wilk-Tests mit einem Signifikanzniveau von 5 % einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammen.<sup>24</sup>

## 6.5.2 Grafische Auswertung

Die grafische Auswertung erfolgt im Wesentlichen durch Häufigkeitsverteilungen und Punktdiagramme, die mit R bzw. mit MS Excel erstellt wurden. Für Fragen, bei denen quantitative Werte abgefragt wurden (z.B. bei der Frage nach Korrelationen) erfolgen die Auswertungen anhand von Violinplots. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung der klassischen Boxplots.

### Boxplot

Die Darstellung von Daten in Form von Boxplots geht auf Tukey<sup>25</sup> zurück. Es handelt sich dabei um eine schematische Darstellung der Lage und Streubreite und gibt Hinweise auf evtl. vorhandene Ausreißer und Extremwerte (siehe Abb. 6-5 – links). Die Box selbst deckt im Diagramm den Interquartilsabstand (IQR) zwischen dem 25 %- und dem 75 %-Quantil ab. Der Median ( $x_{0,50}$ ) wird mit einer durchgezogenen Linie innerhalb der Box eingezeichnet. Werte die zwischen dem oberen Ende der Box ( $x_{0,75}$ ) und dem „upper fence“ ( $x_{0,75} + 1,5 \cdot \text{IQR}$ ) bzw. zwischen dem unteren Ende der Box ( $x_{0,25}$ ) und dem „lower fence“ ( $x_{0,25} - 1,5 \cdot \text{IQR}$ ) liegen, werden durch „Antennen“ („whisker“) dargestellt.

Als Ausreißer (durch einen Kreis dargestellt) werden jene Werte bezeichnet, die über dem „upper fence“ bzw. unter dem „lower fence“ liegen. Sind Werte mehr als drei Interquartilsabstände (IQR) vom Rand der Box entfernt, handelt es sich um Extremwerte (durch einen Stern gekennzeichnet). Wahlweise kann auch noch der Mittelwert  $\bar{x}$  im Boxplot (z.B. als strichlierte Linie) dargestellt werden.

<sup>23</sup> Alternativ kann auch die Funktion „huber“ für die Berechnungen verwendet werden. Diese passt die Standardabweichung nicht iterativ an, sondern hält diese mit  $1,4826 \cdot \text{MAD}$  konstant. In der Literatur wird über Vor- und Nachteile der beiden Verfahren diskutiert. Bei „Huber’s Proposal 2“ (Funktion: „hubers“) können bei sehr kleinen Datensätzen und extremen Ausreißern aufgrund des niedrigen Bruchpunktes des Schätzers weniger robuste Ergebnisse erzielt werden. Für diese Arbeit wird dennoch die Funktion „hubers“ verwendet. Weiterführend wird auf Rousseeuw/Verboven (2002). Robust estimation in very small samples. S. 741ff, verwiesen.

<sup>24</sup> Die Nullhypothese des Shapiro-Wilk-Tests lautet, dass eine Normalverteilung der Grundgesamtheit vorliegt. Wenn der ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau  $\alpha$  (hier: 5 %) ist, wird die Nullhypothese beibehalten. Wird also beispielsweise ein Datensatz mit einem Signifikanzniveau von 5 % auf Normalverteilung getestet, wird die Nullhypothese bei einem p-Wert von 0,02 abgelehnt. Vgl. Liu (2012). Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik für Bauingenieure. S. 149ff und S. 225

<sup>25</sup> Vgl. Tukey (1977). Exploratory Data Analysis. S. 39ff

## Violinplot

Violinplots stellen eine Erweiterung der bekannten Boxplots dar. Sie kombinieren die Informationen einer Dichtefunktion (oder eines geglätteten Histogramms) mit jenen eines Boxplots in einem Diagramm. Der Name „Violinplot“ geht dabei auf die Form einer der ersten Analysen mit dieser kombinierten Darstellung zurück, die die Form einer Violine aufwies.<sup>26</sup>

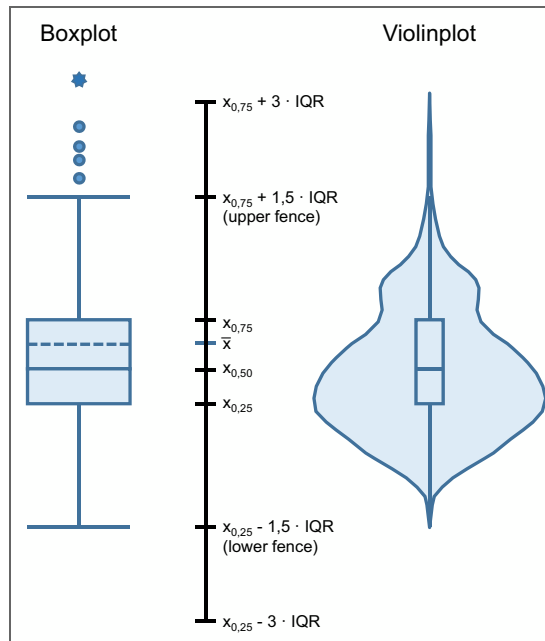


Abb. 6-5 Vergleich zwischen Boxplot (links) und Violinplot (rechts)<sup>27</sup>

Violinplots (siehe Abb. 6-5 – rechts) haben den Vorteil, dass neben den Informationen eines Boxplots (siehe Abb. 6-5 – links) auch noch die Verteilungscharakteristika grafisch dargestellt werden. Dabei wird der Dichteverlauf symmetrisch links und rechts des (vertikalen) Boxplots aufgetragen.<sup>28</sup> Die beiden Hälften des Violinplots unterscheiden sich nur in der Richtung, in der die Dichte aufgetragen wird. Sie sind also entlang der Achse, auf welcher der betrachtete Parameter aufgetragen wird, gespiegelt. Diese symmetrische Darstellung erleichtert die Interpretation und den Vergleich mehrerer nebeneinander aufgetragener Verteilungen.<sup>29</sup>

In Abb. 6-5 sind einander ein Box- und ein Violinplot für die gleiche Datenbasis gegenübergestellt. Die Darstellung des Mittelwerts bei Boxplot-Diagrammen ist optional und wird nicht immer vorgenommen. Auch die Unterscheidung zwischen Ausreißern (als Kreis dargestellt) und Extremwerten (als Stern dargestellt) wird in der Literatur nicht einheitlich vorgenommen. Ebenso wird die Darstellung von Ausreißern und Extremwerten bzw. des Mittelwerts bei Violinplots unterschiedlich gehandhabt. Entscheidend ist, welche Informationen aus den jeweiligen Darstellungsformen ablesbar sein sollen. Idealerweise werden die Diagramme durch eine Tabelle mit Angaben der deskriptiven Datenauswertung ergänzt.

<sup>26</sup> Vgl. Hintze/Nelson (1998), Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism, S. 181

<sup>27</sup> Vgl. Hintze/Nelson (1998), Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism, S. 181

<sup>28</sup> Analog können Box- und Violinplots auch horizontal dargestellt werden.

<sup>29</sup> Vgl. Hintze/Nelson (1998), Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism, S. 181f

Violinplots haben weiters den Vorteil, dass die Form der Verteilung bzw. vorhandene Anhäufungen in bestimmten Wertebereichen besser ersichtlich sind. Diese Informationen können bei den klassischen Boxplots verloren gehen, wie Abb. 6-6 zeigt. Es handelt sich bei dieser Darstellung um 10.000 Zufallszahlen innerhalb vorgegebener Verteilungsfunktionen, die einander als Boxplot und Violinplot gegenübergestellt sind. Die Boxplots für eine bimodale Verteilung und eine Rechteckverteilung weisen keine Unterschiede auf. Werden allerdings die entsprechenden Violinplots miteinander verglichen, kann der bimodale Verlauf (links unten in Abb. 6-6) sehr gut von der Rechteckverteilung unterschieden werden. Die Normalverteilung unterscheidet sich sowohl in der Boxplot- als auch in der Violinplot-Darstellung deutlich von den beiden anderen Verteilungen.

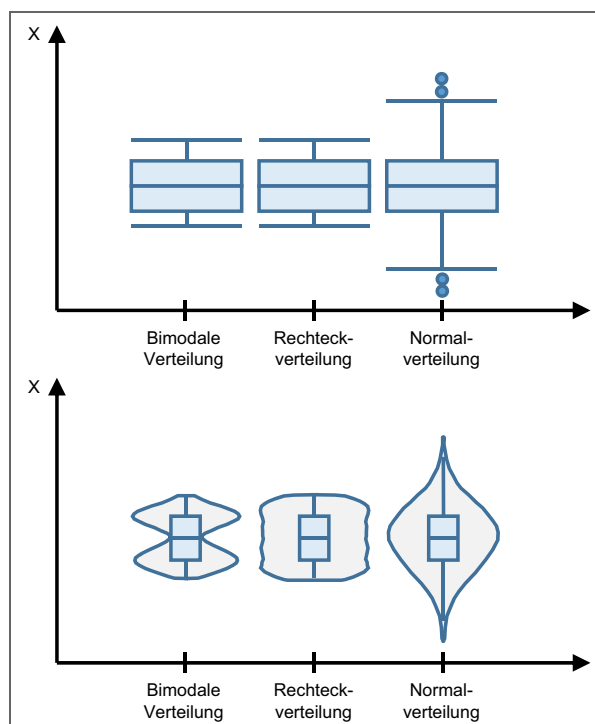


Abb. 6-6 Qualitative Gegenüberstellung ausgewählter Boxplots und Violinplots<sup>30</sup>

Bei der Interpretation von Abb. 6-6 könnte vermutet werden, dass der bimodalen Verteilung weniger Datenpunkte zugrunde liegen, als z.B. dem Violinplot der Normalverteilung, da die Fläche der Violinplots unterschiedlich groß ist. Die in Abb. 6-6 von Hintze/Nelson gewählte Darstellungsform, bei der die Spitzen der Violinplots (unabhängig von der Anzahl der Datenpunkte) mit der gleichen Breite des Dichteverlaufs dargestellt werden, wird für die vorliegende Arbeit nicht angewendet.

Für die nachfolgend gezeigten Auswertungen werden die Violinplots, die in einem Diagramm gemeinsam abgebildet werden, jeweils mit der gleichen Fläche dargestellt, um besonders häufige Nennungen in einem Wertebereich auch aufgrund der Breite des Violinplots erkennen zu können. Eine Aussage

<sup>30</sup> Vgl. Hintze/Nelson (1998). Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism. S. 182

darüber, wieviele Datenpunkte den Violinplots zugrunde liegen, ist dadurch nicht möglich. Die Anzahl der Nennungen wird daher separat in den Tabellen der deskriptiven Datenauswertung angeführt und teilweise durch Punkte direkt in den Violinplots dargestellt. Die Flächen mehrerer unterschiedlicher Violinplots, die in unterschiedlichen Diagrammen dargestellt werden, können nicht miteinander verglichen werden.

Der Nachteil von Violinplots liegt in der subjektiven Wahl der Glättung des Dichteverlaufs. Wird der entsprechende Faktor zu gering gewählt, entsteht ein „wackeliger“ Verlauf, der von einzelnen Datenpunkten deutlich beeinflusst werden kann. Wird der Faktor zu groß gewählt, kommt es zu einer zu starken Glättung. Dies kann dazu führen, dass die Form des Violinplots die Eindeutigkeit einer Verteilung vortäuscht, obwohl das Datenmaterial für einen solchen Schluss vielleicht zu klein ist. Das Problem der Wahl dieses Faktors ist mit der Wahl der Klassenbreite bei Histogrammen vergleichbar. Auch hier kann durch die subjektive Festlegung ein verfälschtes Bild der Datenbasis erzeugt werden. Als Faustregel wird angegeben, dass 30 Datenpunkte für die Darstellung als Violinplot vorhanden sein sollten.<sup>31</sup>

Obwohl bei der vorliegenden ExpertInnenbefragung weniger als 30 Antworten erhoben werden konnten, erfolgt – sofern es als sinnvoll erachtet wird – die Datenanalyse neben deskriptiven Auswertungen auch mit Violinplots, um häufige Nennungen in einem bestimmten Wertebereich auch grafisch dazustellen. Die Anpassung der Glättung erfolgt dabei subjektiv je nach zugrunde gelegter Datenbasis.

## 6.6 Darstellung der Ergebnisse der ExpertInnenbefragung

Nachfolgend werden die Ergebnisse ausgewählter Fragen in Form von deskriptiven und grafischen Auswertungen beschrieben und diskutiert.

### 6.6.1 Kombination von Produktionsfaktoren

Im Zuge der ExpertInnenbefragung wurde erhoben, welche Produktivitätsverluste aus der Erfahrung der ExpertInnen bei zu kurzer bzw. zu langer Bauzeit häufig gemeinsam auftreten. Durch Ankreuzen vorgegebener Antwortmöglichkeiten (siehe Abb. 6-7) sowie durch die Angabe eigener (im Fragebogen nicht angeführter) Produktivitätsverluste, wurden die häufigsten Kombinationen von Produktivitätsverlusten für eine zu kurze bzw. zu lange Bauzeit ermittelt.

<sup>31</sup> Vgl. Hintze/Nelson (1998), Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism, S. 181f

**6 Welche Produktivitätsverluste treten aus Ihrer Erfahrung bei zu kurzer bzw. zu langer Bauzeit meist gemeinsam auf?**

Je Kombination (Spalten) sind zwei oder mehrere gemeinsam auftretende Produktivitätsverluste durch ankreuzen zu markieren. Bis zu drei Kombinationen können für eine zu kurze und zu lange Bauzeit angegeben werden.

Unter "gemeinsam" auftretenden Produktivitätsverlusten werden hier jene verstanden, die zumindest über die Dauer von mehreren Tagen gleichzeitig auftreten.

Produktivitätsverlust	zu kurze Bauzeit			zu lange Bauzeit		
	Kombination 1	Kombination 2	Kombination 3	Kombination 1	Kombination 2	Kombination 3
zu geringe Krankkapazität	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
zu geringer Arbeitsraum	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
erhöhte tägliche Arbeitszeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppen- bzw. Kolonnengröße	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Unterschreitung der optimalen Arbeitsgruppen- bzw. Kolonnengröße	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
veränderte Lichtverhältnisse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ungeplante Wechsel des Einsatzorts	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
zu kurze Planvorlaufzeit und mangelnde Planungsqualität	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
weitere Angaben: _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
weitere Angaben: _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Abb. 6-7** Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 6

Die im Fragebogen vorgegebenen Produktivitätsverluste (siehe Abb. 6-7) werden für die Auswertungen mit den Buchstaben A bis H (in der angegebenen Reihenfolge des Fragebogens von oben nach unten) abgekürzt.<sup>32</sup> Die von den ExpertInnen zusätzlich genannten Produktivitätsverluste werden getrennt nach zu kurzer und zu langer Bauzeit betrachtet und mit den nachfolgend angegebenen Buchstaben abgekürzt und in den Auswertungen angeführt.

- zu kurze Bauzeit
  - I ... Änderungen durch AG
  - J ... fehlende Fachkräfte
  - K ... Personalwechsel
  - L ... besondere Einsatzorte – z.B. Seehöhe, Hochhäuser
- zu lange Bauzeit
  - I ... nicht ausgenutzte Gerätekapazität (Vorhaltekosten)
  - J ... mangelnder Entscheidungsdruck / langsame Planung
  - K ... Druck auf Baustelle fehlt / Motivation
  - L ... Personalwechsel
  - M ... besondere Einsatzorte z.B. Seehöhe, Hochhäuser
  - N ... Arbeitspausen (mehrere Tage)
  - O ... Leerlauf
  - P ... erhöhter Materialeinsatz
  - Q ... Vorhaltezeit

<sup>32</sup> Vgl. Abb. 6-7: A ... zu geringe Krankkapazität; B ... zu geringer Arbeitsraum; C ... erhöhte tägliche Arbeitszeit; D... Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppen- bzw. Kolonnengröße; E ... Unterschreitung der optimalen Arbeitsgruppen- bzw. Kolonnengröße; F ... veränderte Lichtverhältnisse; G ... ungeplante Wechsel des Einsatzorts; H ... zu kurze Planvorlaufzeit und mangelnde Planungsqualität

Die zusätzlich genannten Produktivitätsverluste haben für die Auswertung nur eine geringe Bedeutung, da sie nur von wenigen der Befragten benannt wurden und damit keine großen Häufigkeiten aufweisen.

Sowohl für eine zu kurze als auch für eine zu lange Bauzeit hatten die ExpertInnen die Möglichkeit drei Kombinationen von Produktivitätsverlusten durch Ankreuzen zu benennen. Insgesamt wurden von den ExpertInnen für eine zu kurze Bauzeit 58 und für eine zu lange Bauzeit 33 Kombinationen angegeben. Die Anzahl von Einzelproduktivitätsverlusten, die in Kombinationen genannt wurden, werden in weiterer Folge auf die jeweilige Gesamtanzahl der angeführten Kombinationen bezogen und die Prozentwerte in Form von Balkendiagrammen dargestellt. Dies erlaubt den Vergleich der relativen Häufigkeit einzelner Produktivitätsverluste zwischen zu kurzer und zu langer Bauzeit.

Für die Frage nach den Kombinationen der Produktivitätsverluste bei zu kurzer bzw. zu langer Bauzeit gaben insgesamt 25 (zu kurze Bauzeit) bzw. 24 (zu lange Bauzeit) ExpertInnen eine Antwort ab. Dabei wurden jeweils zwischen einer und vier Kombination(en) an Produktivitätsverlusten angegeben.

Im Zuge der Auswertung wurden jeweils die häufigsten Nennungen von 2er, 3er und 4er Kombinationen aus den Antworten gefiltert. Beispielsweise lässt sich die Anzahl der möglichen 2er Kombinationen mit den Werkzeugen der Kombinatorik (siehe Glg. (6-5)) aus einer angegebenen 4er Kombination ermitteln. Für die gesuchten Kombinationen ist für  $n$  ein Wert von 4 (Auswahl aus einer 4er Kombination) und für  $k$  ein Wert von 2 (gesuchte Kombinationsart) einzusetzen. Hat einer/eine der Befragten eine 4er Kombination angegeben, gibt es demnach insgesamt sechs 2er Kombinationen, die in dieser Antwort enthalten sind.

$$\frac{n!}{k! \cdot (n-k)!} = \frac{4!}{2! \cdot (4-2)!} = 6 \quad (6-5)$$

#### 6.6.1.1 Zu kurze Bauzeit

In Tab. 6-2 ist für jeden Produktivitätsverlust (Spalte A) die Anzahl der Nennungen (Spalte B) im Zuge der von den ExpertInnen definierten Kombinationen aufgelistet. Diese Werte werden auf die Gesamtanzahl der genannten Kombinationen (= 58) bezogen und ergeben in Spalte C die relative Häufigkeit, mit der ein einzelner Produktivitätsverlust Teil einer Kombination ist.

Die verringerte Krankkapazität (A) kam beispielsweise bei zu kurzer Bauzeit in 24 der genannten Kombinationen vor. Die relative Häufigkeit ergibt sich dabei mit 41,38 % (=  $24 / 58 \cdot 100$  %). Die verringerte Krankkapazität war damit in ca. 41 % der Antworten Teil der genannten Kombinationen.



Produktivitätsverluste bei zu kurzer Bauzeit			
Lfd. Nr.	Produktivitätsverlust	Anzahl der Nennungen	Relative Häufigkeit
0	A	B	C
1	A	24	41 %
2	B	13	22 %
3	C	31	53 %
4	D	28	48 %
5	E	7	12 %
6	F	17	29 %
7	G	19	33 %
8	H	32	55 %
9	I	3	5 %
10	J	5	9 %
11	K	1	2 %
12	L	1	2 %
13	Anzahl der Kombinationen	58	

**Tab. 6-2** Ermittlung der relativen Häufigkeit einzelner Produktivitätsverluste bezogen auf die Gesamtanzahl der genannten Kombinationen – zu kurze Bauzeit<sup>33</sup>

Die relativen Häufigkeiten werden in Abb. 6-8 einander gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass zu kurze Planvorlaufzeiten bzw. mangelnde Planungsqualität (H), eine erhöhte tägliche Arbeitszeit (C), die Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (D) sowie eine zu geringe Krankapazität (A) am häufigsten in Kombination mit anderen Produktivitätsverlusten auftreten. Weitere Produktivitätsverluste mit einer relativ hohen Anzahl an Nennungen sind ungeplante Wechsel des Einsatzorts (G), veränderte Lichtverhältnisse (F) und eine Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche (B).

Eine Unterschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (E) wird von den ExpertInnen bei der Frage nach Kombinationen eher selten angegeben. Bei den Produktivitätsverlusten I bis L handelt es sich um jene, die die TeilnehmerInnen der Umfrage frei formulieren konnten, daher ist hier auch die Anzahl der Nennungen entsprechend geringer.

Insgesamt wurden Kombinationen angegeben die zwischen einem und maximal sieben Einzelproduktivitätsverlusten enthielten.

Aus der Darstellung in Abb. 6-8 kann keine Aussage darüber getroffen werden, welche Produktivitätsverluste nun tatsächlich bei einer zu kurzen Bauzeit häufig gemeinsam auftreten. Dazu wurden alle angegebenen Kombinationen analysiert und die häufigsten 2er, 3er und 4er Kombinationen gefiltert.

<sup>33</sup> Prozentwerte der relativen Häufigkeiten (Spalte C) wurden auf ganze Zahlen gerundet.

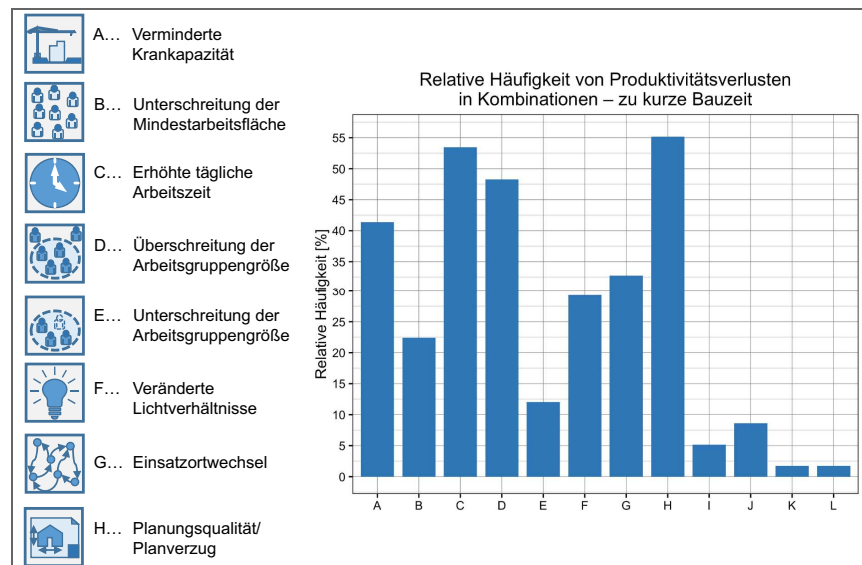


Abb. 6-8 Anzahl der Nennungen von Produktivitätsverlusten bei zu kurzer Bauzeit

In Tab. 6-3 ist ersichtlich, dass bei den 2er Kombinationen das gemeinsame Auftreten von zu geringer Krankkapazität (A) und einer Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (D) am häufigsten von den ExpertInnen genannt wurde (19 Nennungen).

Weitere Kombinationen mit einer großen Anzahl an Nennungen sind:

- Erhöhte tägliche Arbeitszeit (C) und zu kurze Planvorlaufzeit/mangelnde Planungsqualität (H)
- Erhöhte tägliche Arbeitszeit (C) und Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (D)
- Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (D) und zu kurze Planvorlaufzeit/mangelnde Planungsqualität (H)

Je höher die Anzahl der Einzelproduktivitätsverluste für die Bildung von Kombinationen wird, desto weniger Nennungen für konkrete Kombinationen sind aus dem Datenpool zu filtern. Für 3er Kombinationen zeigen sich die folgenden gemeinsam auftretenden Produktivitätsverluste bei zu kurzer Bauzeit:

- Zu geringe Krankkapazität (A), erhöhte tägliche Arbeitszeit (C) und Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (D)
- Zu geringe Krankkapazität (A), Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (D) und zu kurze Planvorlaufzeit/mangelnde Planungsqualität (H)
- Erhöhte tägliche Arbeitszeit (C), Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (D) und zu kurze Planvorlaufzeit/mangelnde Planungsqualität (H)

Lfd. Nr.	2er Kombination		3er Kombination		4er Kombination	
	Anzahl der Nennungen	Kombination	Anzahl der Nennungen	Kombination	Anzahl der Nennungen	Kombination
0	A	B	C	D	E	F
1	19	AD	10	ACD	5	ACDH
2	17	CH	9	ADH	5	CDFG
3	15	CD	9	CDH	5	CDGH
4	15	DH	7	ACH	3	ACDF
5	13	AH	7	CDG	3	ACDG
6	12	AC	7	CGH	3	CDFH
7	12	CF	6	CDF	3	CFGH
8	11	GH	5	ADF	3	DFGH
9	10	CG	5	CFG	2	ACFG
10	8	DF	5	CFH	2	ACGH
11	8	FG	5	DFG	2	ADEH
12	7	BH	5	DGH	2	ADFG
13	7	DG	4	DFH	2	ADFH
14	6	FH	3	ABH	2	ADGH
15	5	AF	3	ACF	2	CDHI
16	5	AG	3	ACG		
17	5	BC	3	ADG		
18	5	BD	3	AGH		
19	4	CE	3	BCH		
20	4	EH	3	BDH		
21	3	AB	3	FGH		
22	3	BG	2	ADE		
23	3	DJ	2	AEH		
24	3	EG	2	AFG		
25	3	HI	2	AFH		
26	2	AE	2	CDI		
27	2	BF	2	CEG		
28	2	CI	2	CHI		
29	2	CJ	2	DEH		
30	2	DE	2	DHI		
31	2	DI	2	EGH		
32	2	GI	2	GHI		
33	2	HJ				

**Tab. 6-3** 2er, 3er und 4er Kombinationen von Produktivitätsverlusten bei zu kurzer Bauzeit

Bei 4er Kombinationen sinkt die Anzahl der von den ExpertInnen angeführten und übereinstimmenden Nennungen weiter. Die häufigsten 4er Kombination enthalten alle die beiden Einzelproduktivitätsverluste erhöhte tägliche Arbeitszeit (C) und Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (D). Zusammen mit folgenden Produktivitätsverlusten ergeben sich die häufigsten 4er Kombinationen entsprechend Tab. 6-3 Spalte F (Zeilen 1 bis 3):

- zu geringe Krankapazität (A)
- veränderte Lichtverhältnisse (F)
- ungeplante Wechsel des Einsatzorts (G)
- zu kurze Planvorlaufzeit/mangelnde Planungsqualität (H)

Weitere 2er, 3er und 4er Kombinationen, die jeweils nur einmal genannt wurden, sind in Tab. 6-3 nicht dargestellt.

### 6.6.1.2 Zu lange Bauzeit

Für das gemeinsame Auftreten von Einzelproduktivitätsverlusten bei zu langer Bauzeit wurden von den ExpertInnen deutlich weniger Kombinationen

angegeben (= 33). In den mündlichen Fragebogenerörterungen stellte sich heraus, dass die meisten der ExpertInnen in ihren Projekten häufiger mit zu kurzen als mit zu langen Bauzeiten konfrontiert sind.

Insgesamt wurden Kombinationen angegeben die zwischen einem und maximal vier Einzelproduktivitätsverlusten enthielten.

In Tab. 6-4 ist für jeden Produktivitätsverlust (Spalte A) die Anzahl der Nennungen (Spalte B) im Zuge der von den ExpertInnen definierten Kombinationen aufgelistet. Diese Werte werden auf die Gesamtanzahl der genannten Kombinationen (= 33) bezogen und ergeben in Spalte C die relative Häufigkeit, mit der ein einzelner Produktivitätsverlust Teil einer Kombination ist.

Die Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche (B) kam beispielsweise bei zu langer Bauzeit in drei der genannten Kombinationen vor. Die relative Häufigkeit ergibt sich dabei mit 9,09 % (=  $3 / 33 \cdot 100$  %). Die Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche war damit in ca. 9 % der Antworten Teil der genannten Kombinationen.

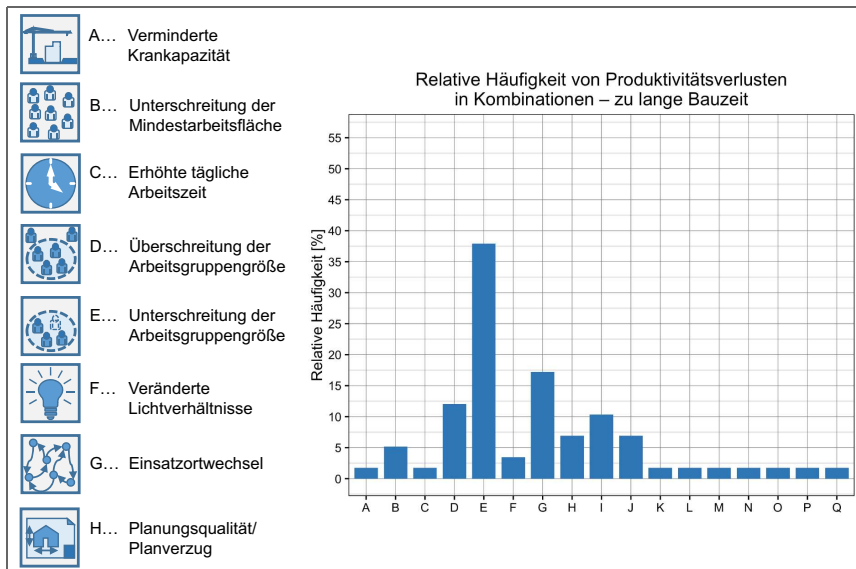
Produktivitätsverluste bei zu langer Bauzeit			
Lfd. Nr.	Produktivitätsverlust	Anzahl der Nennungen	Relative Häufigkeit
0	A	B	C
1	A	1	3 %
2	B	3	9 %
3	C	1	3 %
4	D	7	21 %
5	E	22	67 %
6	F	2	6 %
7	G	10	30 %
8	H	4	12 %
9	I	6	18 %
10	J	4	12 %
11	K	1	3 %
12	L	1	3 %
13	M	1	3 %
14	N	1	3 %
15	O	1	3 %
16	P	1	3 %
17	Q	1	3 %
18	Anzahl der Kombinationen	33	

**Tab. 6-4** Ermittlung der relativen Häufigkeit einzelner Produktivitätsverluste bezogen auf die Gesamtanzahl der genannten Kombinationen – zu lange Bauzeit<sup>34</sup>

Die relativen Häufigkeiten werden in Abb. 6-9 einander gegenübergestellt. Deutlich sticht bei den genannten Einzelproduktivitätsverlusten die Unterschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (E) hervor. Dies begründet sich dadurch, dass bei einer zu langen Bauzeit eher weniger Arbeitskräfte auf der Baustelle sind und dadurch die für bestimmte Arbeiten erforderliche optimale Anzahl an Arbeitskräften nicht zur Verfügung steht. Weitere Produktivitätsverluste, die bei zu langer Bauzeit häufiger genannt wurden sind ungeplante Wechsel des Einsatzorts (G)<sup>35</sup>, Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (D)<sup>36</sup> und ungenutzte Gerätekapazitäten (I).

<sup>34</sup> Prozentwerte der relativen Häufigkeiten (Spalte C) wurden auf ganze Zahlen gerundet.

<sup>35</sup> Nicht nur innerhalb der Baustelle sondern auch über mehrere Baustellen übergreifend – hier wirkt sich ein Produktivitätsverlust unter Umständen auch auf andere Baustellen aus.



**Abb. 6-9** Anzahl der Nennungen von Produktivitätsverlusten bei zu langer Bauzeit

Die Analyse der konkreten Kombinationen zeigt nur für 2er und 3er Kombinationen eine sinnvolle Auswertung, da für eine zu lange Bauzeit insgesamt nur eine 4er Kombination von den ExpertInnen benannt wurde. Tab. 6-5 zeigt weiters, dass überhaupt nur für 2er Kombinationen Mehrfachnennungen ermittelt werden konnten. Weitere 2er Kombinationen, die jeweils nur einmal genannt wurden, sind in Tab. 6-5 nicht dargestellt.

Lfd. Nr.	2er Kombination		3er Kombination	
	Anzahl der Nennungen	Kombination	Anzahl der Nennungen	Kombination
0	A	B	C	D
1	6	EG	1	AEG
2	3	EI	1	BDJ
3	2	BE	1	DFG
4	2	DG	1	DGI
5	2	DH	1	DHI
6	2	DI	1	EIJ
7	2	EJ	1	EIK
8			1	EJK
9			1	EPQ
10			1	IJK

**Tab. 6-5** 2er und 3er Kombinationen von Produktivitätsverlusten bei zu langer Bauzeit

Die häufigste Kombination bei zu langer Bauzeit ergibt sich aus einer Unterschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße (E) sowie ungeplante Wechsel des Einsatzorts (G).

<sup>36</sup> Kommt dann vor, wenn Arbeiten aufgrund zu langer Bauzeit „hinausgeschoben“ werden und dadurch gegen Ende der Bauzeit mit einer größeren Anzahl an Arbeitskräften forciert werden muss.

### 6.6.2 Anzahl an Produktivitätsverlusten

Zusätzlich zu der Frage nach den konkreten Kombinationen einzelner Produktivitätsverluste wurde erhoben, wie viele Produktivitätsverluste generell bei Hochbauprojekten im Durchschnitt gemeinsam bei zu kurzer und zu langer Bauzeit auftreten (siehe Abb. 6-10).

**7 Wie viele Produktivitätsverluste treten Ihrer Meinung nach bei Hochbauprojekten im Durchschnitt gemeinsam auf?**

Beispiele für Produktivitätsverluste im Hochbau siehe Frage 6.

Unter "gemeinsam" auftretenden Produktivitätsverlusten werden hier jene verstanden, die zumindest über die Dauer von mehreren Tagen gleichzeitig auftreten.

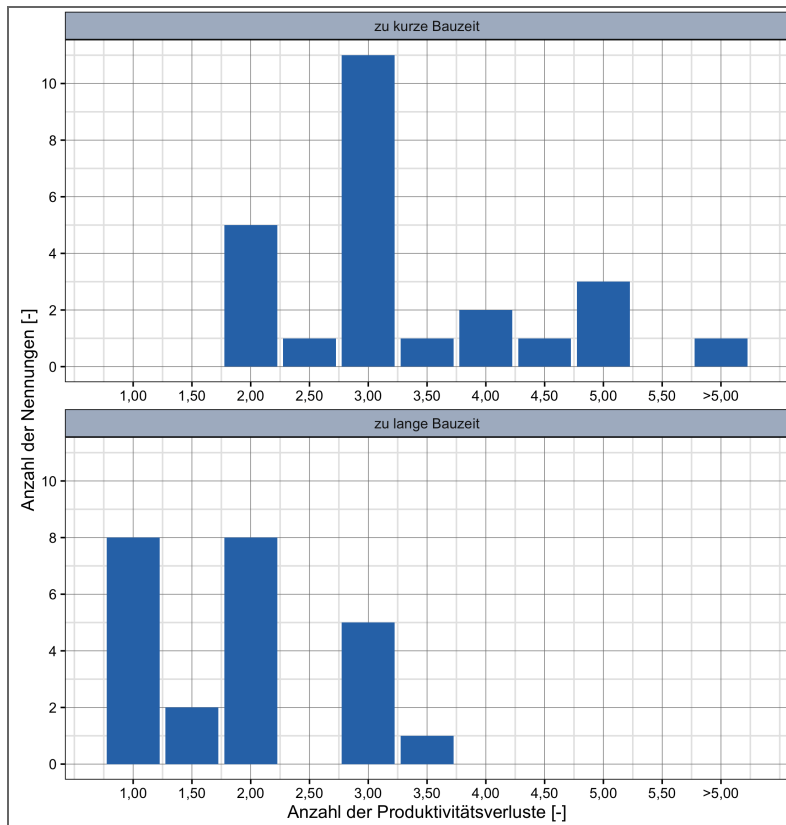
Bitte kreuzen Sie an!

Anzahl gemeinsam auftretender Produktivitätsverluste bei zu kurzer Bauzeit	1	2	3	4	5	> 5
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anzahl gemeinsam auftretender Produktivitätsverluste bei zu langer Bauzeit	1	2	3	4	5	> 5
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Abb. 6-10** Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 7

Bei den Antwortmöglichkeiten könnte auf den ersten Blick eine Verhältnisskala oder zumindest eine Intervallskala vermutet werden. Da jedoch auch die Antwortmöglichkeit „> 5“ möglich ist, handelt es sich tatsächlich um eine Ordinalskala. Mathematische Operationen (z.B. die Berechnung von Mittelwerten, Standardabweichungen, M-Schätzern) können damit nicht sinnvoll durchgeführt werden. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt daher durch die Darstellung der Häufigkeiten der Antworten in Form von Balkendiagrammen. Einige der ExpertInnen gaben an, dass sich die Anzahl der Produktivitätsverluste zwischen zwei Antwortmöglichkeiten befindet (z.B. zwischen zwei und drei Produktivitätsverlusten). In solchen Fällen geht der Mittelwert dieser Nennungen in die Auswertung mit ein. Auf den Abszissen der Diagramme sind daher nicht nur die ganzzahligen Werte aus dem Fragebogen, sondern auch Zwischenwerte aufgetragen (siehe Abb. 6-11).

Insgesamt wurden 25 (zu kurze Bauzeit) bzw. 24 (zu lange Bauzeit) Nennungen von den ExpertInnen abgegeben. Die häufigste Angabe bei zu kurzer Bauzeit liegt eindeutig bei drei Produktivitätsverlusten die durchschnittlich gemeinsam auftreten. Bei der zu langen Bauzeit gibt es zwei Modi bei einem und bei zwei Produktivitätsverlusten. Zusätzlich wurde von zwei der Befragten auch noch angegeben, dass sie einen oder zwei Produktivitätsverlust(e) erwarten – der Mittelwert mit 1,50 ging dabei in die grafische Auswertung ein.



**Abb. 6-11** Durchschnittliche Anzahl der gemeinsam auftretenden Produktivitätsverluste im Hochbau – bei zu kurzer und zu langer Bauzeit

Die Spannweite der Antworten ist bei zu kurzer Bauzeit größer (von 2 bis > 5) als bei einer zu langen Bauzeit (von einem bis 3,5). Generell sehen die ExpertInnen bei einer zu langen Bauzeit ein geringeres Potential für das Auftreten von Produktivitätsverlusten. Es zeigt sich deutlich, dass bei einer zu kurzen Bauzeit tendenziell mit mehr Produktivitätsverlusten gerechnet wird, als bei einer zu langen Bauzeit (siehe auch Median und Modus in Tab. 6-6).

Lfd. Nr.	Parameter	zu kurze Bauzeit	zu lange Bauzeit
0	A	B	C
1	n	25,00	24,00
2	Median	3,00	2,00
3	Modus	3,00	1,00 bzw. 2,00
4	Minimum	2,00	1,00
5	Maximum	> 5,00	3,50

**Tab. 6-6** Deskriptive Darstellung der Daten zur Anzahl an Produktivitätsverlusten bei zu kurzer und zu langer Bauzeit im Hochbau

### 6.6.3 Produktivitätsverluste je Projektphase

Neben der Kombination der Produktivitätsverluste und der durchschnittlichen Anzahl an auftretenden Produktivitätsverlusten wurde auch erhoben, welche Produktivitätsverluste in den einzelnen Projektphasen auftreten. Die UmfrageteilnehmerInnen konnten durch Ankreuzen angeben, in welchen Projektphasen die vorgegebenen Produktivitätsverluste ihrer Meinung nach besonders häufig auftreten (siehe Abb. 6-12) – Mehrfachnennungen waren erlaubt.

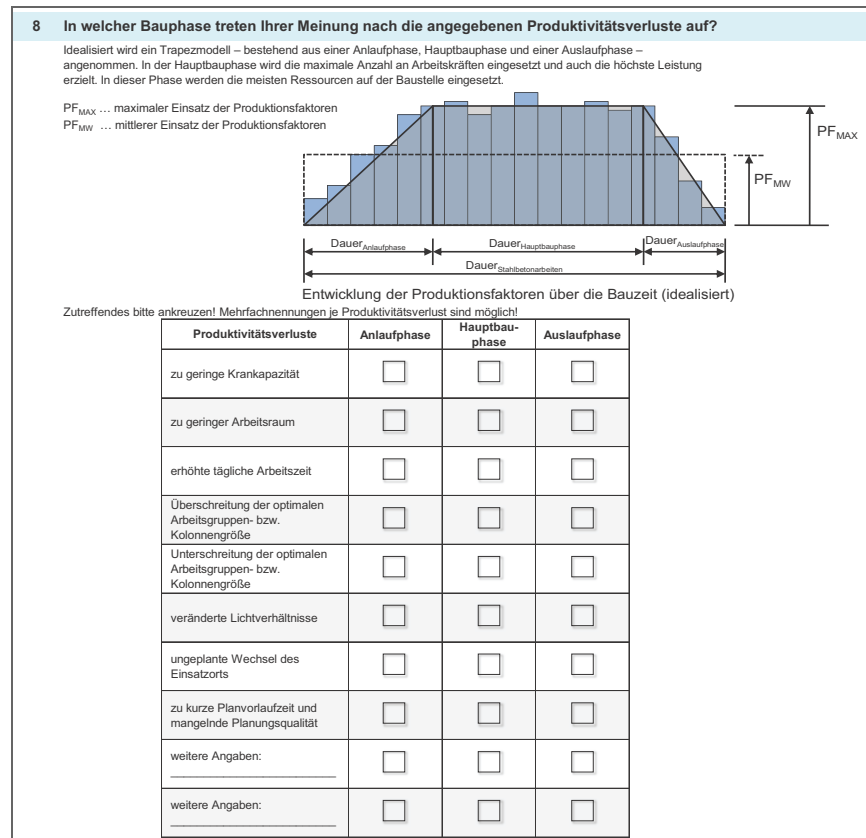


Abb. 6-12 Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 8

Idealisiert wird dabei für den Einsatz der Produktionsfaktoren (PF) ein Trapezmodell – bestehend aus einer Anlauf-, Hauptbau- und Auslaufphase – angenommen. In der Hauptbauphase werden die meisten Ressourcen (z.B. maximale Anzahl an Arbeitskräften) auf der Bautelle eingesetzt (siehe Abb. 6-12) und auch die höchste Leistung erzielt.

Diese Frage wurde von 26 ExpertInnen beantwortet. Die Ergebnisse werden als Balkendiagramme für jede der drei Projektphasen dargestellt und beschrieben. Die ExpertInnen hatten auch bei dieser Frage die Möglichkeit, weitere Produktivitätsverluste anzuführen, wobei folgende zusätzliche Angaben getätigt wurden:

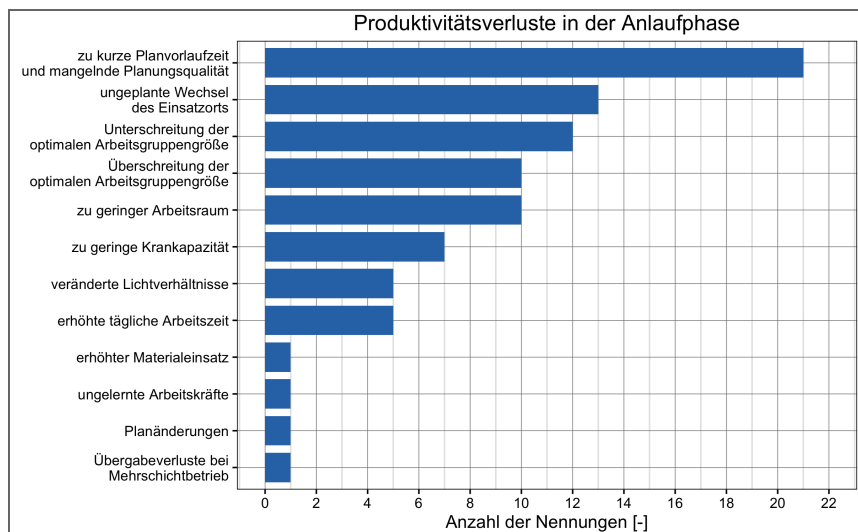


- Übergabeverluste bei Mehrschichtbetrieb
- Planänderungen
- geringe Lagerfläche
- ungelernte Arbeitskräfte
- erhöhter Materialeinsatz
- Vorhaltezeit

Insgesamt wurden für das Auftreten von Produktivitätsverlusten die häufigsten Nennungen (134) in der Hauptbauphase abgegeben – gefolgt von der Anlaufphase (87 Nennungen). In der Auslaufphase (69 Nennungen) sehen die Befragten das geringste Potential für Produktivitätsverluste.

### 6.6.3.1 Produktivitätsverluste in der Anlaufphase

In der Anlaufphase der Ausführung (siehe Abb. 6-13) wurde besonders oft angegeben, dass es zu Produktivitätsverlusten aufgrund von zu kurzen Planvorlaufzeiten und mangelnder Planungsqualität kommt. Dies wird damit begründet, dass die Planung zum Zeitpunkt des Baubeginns meist noch nicht abgeschlossen ist und die Pläne daher erst kurz vor der tatsächlichen Bauausführung fertiggestellt werden. Der von einem/einer der Befragten zusätzlich angegebene Faktor der „Planänderungen“ ist inhaltlich ebenfalls dem hier häufigsten Produktivitätsverlust zuzuordnen.



**Abb. 6-13** Produktivitätsverluste in der Anlaufphase  
(in Summe 87 Nennungen)

Weiters wurde der ungeplante Wechsel des Einsatzorts häufig genannt, da sich das Geschehen und der Ablauf auf der Baustelle oft erst „einspielen“ muss und es auch dazu kommt, dass Arbeitskräfte noch Restarbeiten auf anderen Baustellen zu erledigen haben und nicht den ganzen Tag oder die ganze Woche auf der betreffenden Baustelle sind.

Veränderte Lichtverhältnisse werden als eher seltener Produktivitätsverlust in der Anlaufphase angegeben, da auch eine Erhöhung der täglichen Arbeitszeit bereits in der Anlaufphase seltener angeordnet wird. Auch eine zu geringe Krankkapazität kommt lt. den Angaben der ExpertInnen in der Anlaufphase selten vor, da die maximale Anzahl an Arbeitskräften noch nicht erreicht ist und generell der Ressourceneinsatz geringer ist als in der Hauptbauphase.

### 6.6.3.2 Produktivitätsverluste in der Hauptbauphase

Abb. 6-14 zeigt die Anzahl der Nennungen für Produktivitätsverluste, die in der Hauptbauphase auftreten. Generell ist ein deutlicher Anstieg der Nennungen gegenüber der Anlaufphase zu erkennen. Dies wird damit begründet, dass in der Hauptbauphase die meisten Arbeitskräfte auf der Baustelle im Einsatz sind und generell der Ressourceneinsatz sein Maximum erreicht. In dieser Phase ist das Potential für mögliche Produktivitätsverluste am größten.

Als die häufigsten Produktivitätsverluste in dieser Phase wurden erhöhte tägliche Arbeitszeit, veränderte Lichtverhältnisse und eine zu geringe Krankkapazität angegeben. Auch das Thema zu kurzer Planvorlaufzeiten und mangelnder Planungsqualität hat in der Hauptbauphase ebenso wie in der Anlaufphase eine wesentliche Bedeutung für das Auftreten von Produktivitätsverlusten.<sup>37</sup>

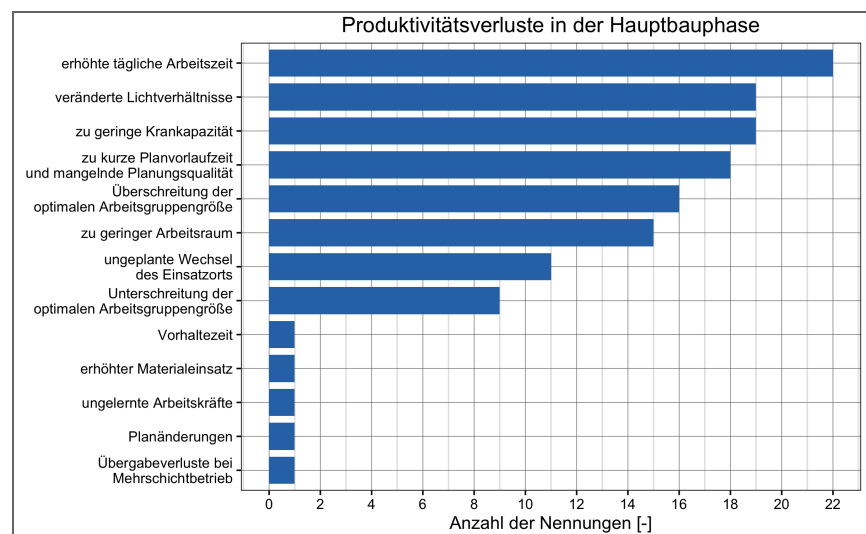


Abb. 6-14 Produktivitätsverluste in der Hauptbauphase (in Summe 134 Nennungen)

Weniger bedeutend für das Auftreten von Produktivitätsverlusten in der Hauptbauphase sind ungeplante Wechsel des Einsatzorts und die Unterschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße. Da in dieser Phase die maximale Anzahl an Arbeitskräften auf der Baustelle zu erwarten ist, kommt es eher zu einer Überschreitung der optimalen Arbeitsgruppengröße bzw. auch zu einer Unterschreitung des Mindestarbeitsraums.

<sup>37</sup> Hier kann der zusätzlich genannte Punkt der „Planänderungen“ ebenfalls inhaltlich hinzugezählt werden.

### 6.6.3.3 Produktivitätsverluste in der Auslaufphase

Die Anzahl der Nennungen für die erwarteten Produktivitätsverluste nimmt in der Auslaufphase generell gegenüber der Hauptbauphase wieder ab (siehe Abb. 6-15) und sinkt insgesamt unter das Niveau der Anlaufphase.

Die häufigste Angabe für Produktivitätsverluste in der Auslaufphase weist der ungeplante Wechsel des Einsatzorts auf. Dies wurde damit begründet, dass Arbeitskräfte beim Abschluss der Arbeiten oft an mehreren unterschiedlichen Orten Restarbeiten verrichten oder aber schon teilweise auf anderen Baustellen eingesetzt werden.

In dieser Phase kann es lt. der Angaben der ExpertInnen auch zu Überschreitungen bzw. in ähnlichem Ausmaß auch zu Unterschreitungen der optimalen Arbeitsgruppengrößen kommen. Eine Unterschreitung ist dann zu erwarten, wenn der Fertigstellungstermin nicht in Gefahr ist und Arbeitskräfte von der Baustelle abgezogen werden. Eine Überschreitung ist dann zu erwarten, wenn die Endphase des Projekts unter hohem Termindruck steht und durch Forcierungen noch versucht wird, den Fertigstellungstermin einzuhalten.



Abb. 6-15 Produktivitätsverluste in der Auslaufphase  
(in Summe 69 Nennungen)

Produktivitätsverluste aufgrund von zu kurzen Planvorlaufzeiten und mangelnder Planungsqualität wurden von den ExpertInnen in der Auslaufphase selten angegeben, da in dieser Phase die Ausführungsplanung in der Regel abgeschlossen ist und die entsprechenden Pläne früh genug zur Verfügung stehen.

### 6.6.4 Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit

Ein Teil der ExpertInnenbefragung widmete sich dem Zusammenhang zwischen der vom AG vorgegebenen Bauzeit und den Herstell- bzw. Baukosten.

Dieser Zusammenhang und eine Auswahl der unterschiedlichen Angaben aus der Literatur wurde bereits in Abschnitt 4.3 gezeigt. Vor der Befragung

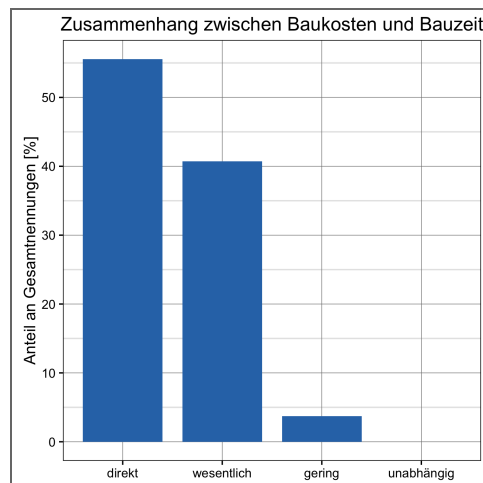
wurde ein nichtlinearer Verlauf mit einem steileren Anstieg der Kosten bei zu kurzer Bauzeit vermutet.

Dieser Fragenblock enthielt mehrere Einzelfragen zum Verlauf des Zusammenhangs zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit. Zunächst sollten die ExpertInnen angeben, ob die vom AG vorgegebene Bauzeit überhaupt einen Einfluss auf die Baukosten hat (siehe Abb. 6-16). Es standen dafür vier Antwortmöglichkeiten zur Verfügung.

9 Hat die vom AG vorgegebene Bauzeit einen Einfluss auf die Baukosten?			
Zutreffendes bitte ankreuzen!			
Es besteht ein <b>direkter Zusammenhang</b> zwischen Baukosten und Bauzeit.	Es besteht ein <b>wesentlicher Zusammenhang</b> zwischen Baukosten und Bauzeit.	Es besteht ein <b>geringer Zusammenhang</b> zwischen Baukosten und Bauzeit.	Baukosten und Bauzeit sind <b>unabhängig</b> voneinander ( <b>kein Zusammenhang</b> ).
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Abb. 6-16** Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 9

Diese Frage wurde von allen 27 ExpertInnen beantwortet. Die Antworten sind in Abb. 6-17 zusammengefasst als Balkendiagramm dargestellt. Auf der Abszisse sind die vier Antwortmöglichkeiten und auf der Ordinate der prozentuelle Anteil an den Gesamtnennungen aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Zusammenhang zwischen den Baukosten und der vorgegebenen Bauzeit als direkt bzw. wesentlich bezeichnet wird. Lediglich eine Nennung erfolgte für einen geringen Zusammenhang ( $1 / 27 \cdot 100 \% = 3,7 \%$ ). Dass Baukosten und Bauzeit unabhängig voneinander sind, wurde von keinem/keiner der ExpertInnen angegeben.



**Abb. 6-17** Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit

Nachdem alle ExpertInnen einen Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit vermuten, wurde weiters gefragt, ob sie bei zu kurzer bzw. zu langer Bauzeit einen höheren Einfluss auf die Kosten sehen oder ob die Auswirkungen unabhängig von der Abweichung zur normalen Bauzeit sind (siehe Abb. 6-18). Es konnte dabei zwischen drei Antwortmöglichkeiten gewählt werden.

Auch diese Frage beantworteten alle ExpertInnen. Die Darstellung der Antworthäufigkeiten erfolgt in Abb. 6-19 als Balkendiagramm. Auf der

Abszisse sind die drei Antwortmöglichkeiten und auf der Ordinate der prozentuelle Anteil an den Gesamtnennungen aufgetragen.

9a Wenn Sie einen Einfluss der vorgegebenen Bauzeit auf die Baukosten vermuten, wo sehen Sie höhere Auswirkungen? Zutreffendes bitte ankreuzen!		
Bei zu kurzer Bauzeit höheren Einfluss auf die Kosten.	Gleiche Auswirkungen bei zu kurzer und zu langer Bauzeit.	Bei zu langer Bauzeit höheren Einfluss auf die Kosten.
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abb. 6-18 Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 9a

Es zeigt sich, dass der überwiegende Teil der ExpertInnen bei einer zu kurzen Bauzeit größere Auswirkungen auf die Baukosten sehen. Nur fünf der Befragten ( $5 / 27 \cdot 100 \% = 18,5 \%$ ) gaben an, dass sie gleiche Auswirkungen auf die Kosten vermuten, unabhängig ob die vorgegebene Bauzeit zu kurz oder zu lang ist. Lediglich einer/eine der TeilnehmerInnen (entspricht  $3,7 \%$  der Befragten) gab an, dass bei einer zu langen Bauzeit eine größere Auswirkung auf die Baukosten zu erwarten ist.

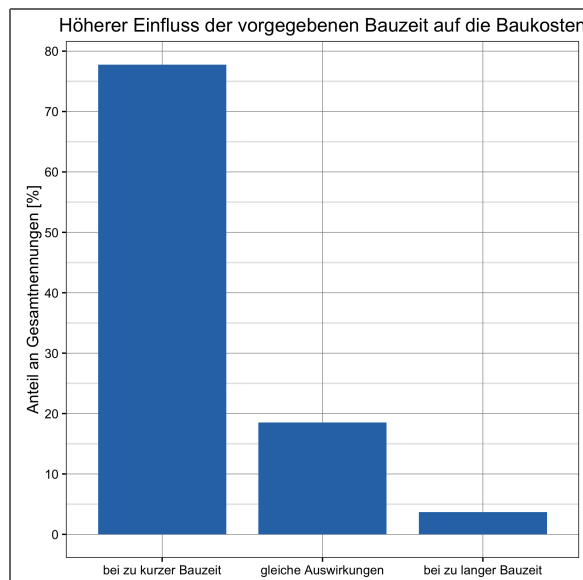


Abb. 6-19 Einfluss der Art der Bauzeitänderung auf die Baukosten

Die ExpertInnen wurden weiters befragt, innerhalb welcher Grenzen sie die vorgegebene Bauzeit als „normal“ bezeichnen würden (siehe Abb. 6-20). Unter einer normalen Bauzeit wird jene verstanden, die so festgelegt wird, dass die Anzahl der Arbeitskräfte und die Anzahl der Geräte, welche produktiv eingesetzt werden sollen, die jeweiligen Maximalwerte um  $10 \%$  unterschreiten.<sup>38</sup>

Die Abfrage des entsprechenden Bereichs erfolgte quantitativ, wobei eine normale Bauzeit bei  $100 \%$  angenommen wurde und die untere und obere Grenze der normalen Bauzeit ebenfalls in Form von Prozentwerten angegeben werden konnte.

<sup>38</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 57

9b In welchen Grenzen würden Sie die vorgegebene Bauzeit als "normal" bezeichnen?			
Unter einer "normalen" Bauzeit versteht man eine Bauzeit, die so festgelegt wird, dass die Anzahl der Arbeitskräfte und die Anzahl der Geräte, welche produktiv eingesetzt werden sollen, die jeweiligen Maximalwerte um 10 % unterschreiten.			
Bitte geben Sie Prozentwerte an!			
	untere Grenze einer normalen Bauzeit	normale Bauzeit	obere Grenze einer normalen Bauzeit
<b>Beispiel</b>	98 %	100 %	102 %
		100 %	

Abb. 6-20 Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 9b

Tab. 6-7 zeigt die deskriptive Darstellung der Daten für die Frage nach dem Bereich der normalen Bauzeit. Insgesamt wurden 26 Nennungen von den ExpertInnen abgegeben. Die Spannweite der Antworten zur oberen Grenze ist deutlich größer als für die untere. Ebenso weist die Standardabweichung für die obere Grenze einen größeren Wert auf als bei der unteren. Dies deutet insgesamt auf eine größere Uneinigkeit der ExpertInnen bei der Festlegung der oberen Grenze der normalen Bauzeit hin.

Lfd. Nr.	Parameter	untere Grenze der normalen Bauzeit	obere Grenze der normalen Bauzeit
0	A	B	C
1	n	26,00	26,00
2	Mittelwert	92,31	109,08
3	Standardfehler des MW	0,77	1,77
4	Standardabweichung	3,93	9,03
5	Variationskoeffizient	4,25 %	8,28 %
6	Median	95,00	105,50
7	MAD	0,00	1,00
8	robuster Variationskoeffizient (basierend auf Median)	0,00 %	0,95 %
9	Modus	95,00	105,00
10	Minimum	80,00	104,00
11	Maximum	96,00	150,00
12	Spannweite	16,00	46,00
13	Schiefe	-1,55	4,05
14	M-Schätzer (H12 (80 %))	95,00	107,25
15	Standardabweichung (H12 (80 %))	-	3,14
16	robuster Variationskoeffizient (basierend auf M-Schätzer)	-	2,92 %
17	Normalverteilung (Shapiro-Wilk, $p < 0,05$ )	Nein	Nein

Tab. 6-7 Deskriptive Darstellung der Daten zu den Grenzen der normalen Bauzeit

Der M-Schätzer für die untere Grenze nimmt den gleichen Wert wie der Median an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der MAD mit null ermittelt wurde und damit keine sinnvollen Grenzen für die Datentransformation angegeben werden können. Im Zuge der Auswertung in R errechnet sich – dadurch, dass  $MAD = 0$  ist – die Standardabweichung des M-Schätzers ebenfalls mit null.<sup>39</sup> Dies erscheint aufgrund der – zwar geringen, aber durchaus vorhandenen – Streuung der Antworten als nicht plausibel. Durch die Sammlung weiterer Daten könnte es hier zu einer Verbesserung der Aussage kommen, sofern der MAD nicht den Wert null annimmt und dadurch auch M-Schätzer inkl. Standardabweichung angegeben werden können.<sup>40</sup>

<sup>39</sup> Man spricht hier auch von einer „Implosion“ des Schätzers.

<sup>40</sup> Wird in R die Funktion „MASS::huber“ verwendet, ist für den Fall, dass  $MAD = 0$  ist, der M-Schätzer und die Standardabweichung des M-Schätzers nicht definiert.

Die Standardfehler der Mittelwerte nehmen relativ niedrige Werte an, womit tendenziell von einer präzisen, erwartungsgetreuen Schätzung der Grenzen ausgegangen werden kann. Insgesamt weisen die Antworten für die untere Grenze eine linksschiefe und für die obere Grenze eine rechtsschiefe Verteilung auf.

In Abb. 6-21 sind die Violinplots für die Bandbreite der normalen Bauzeit aufgetragen. Es zeigt sich deutlich, dass die untere Grenze der normalen Bauzeit in einem engeren Bereich gesehen wird, als dies bei der oberen Grenze der Fall ist. Dies kann auch damit begründet werden, dass die Befragten auch bei einer zu kurzen Bauzeit höhere Auswirkungen auf die Kosten sehen, als bei einer zu langen Bauzeit. Es ist zu erwarten, dass bei einer Bauzeitverlängerung der Anstieg der Kosten nicht so steil ausfällt wie bei einer Verkürzung der Bauzeit.

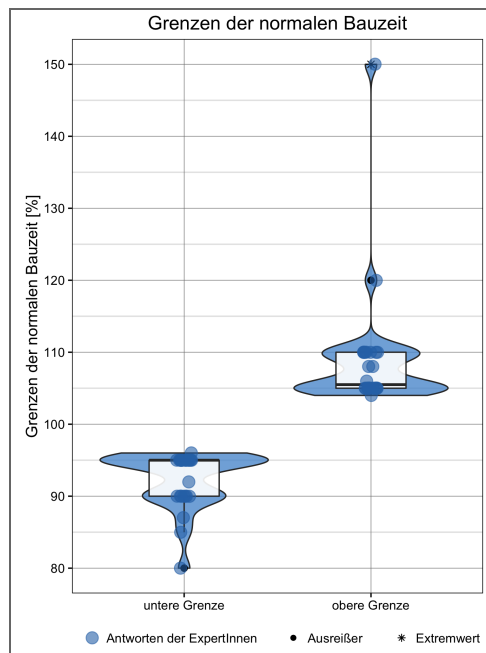


Abb. 6-21 Grenzen der normalen Bauzeit

Der Median der unteren Grenze liegt bei 95,00 % und jener der oberen Grenze bei 105,50 %. Die häufigste Nennung (Modus) für die untere Grenze liegt bei 95,00 %, für die obere Grenze bei 105,00 %.

In den Violinplots sind Ausreißer und Extremwerte erkennbar, die die Mittelwerte verzerren. Es wird daher speziell für die obere Grenze die Anwendung eines robusten Mittelwertschätzers (M-Schätzer nach Huber) empfohlen. Dieser liegt für die obere Grenze bei 107,25 %. Wie bereits ausgeführt, entspricht für diese Auswertung der M-Schätzer für die untere Grenze dem Median und beträgt 95,00 %. Innerhalb dieser Bandbreite (95,00 % und 107,25 %) ist nur ein geringer Anstieg der Kosten zu erwarten.

Weiters wurde erhoben, wie weit die vorgegebene Bauzeit, auf Basis der normalen Bauzeit, maximal verkürzt werden kann, sodass Arbeiten in Hinblick auf Kosten und Qualität noch sinnvoll durchgeführt werden können (siehe Abb. 6-22). Auch bei dieser Frage wurden Prozentwerte abgefragt und

anhand einer deskriptiven Statistik (siehe Tab. 6-8) sowie mit Hilfe eines Violinplots (siehe Abb. 6-23) analysiert. Diese Frage wurde in allen abgegebenen Fragebögen beantwortet.

9c Wie weit kann die vorgegebene Bauzeit, ausgehend von einer "normalen" Bauzeit (= 100 %), verkürzt werden, sodass Arbeiten im Hinblick auf Kosten und Qualität noch sinnvoll durchgeführt werden können?		
Geben Sie bitte jenen Prozentsatz der normalen Bauzeit an, bei dem Sie ein "No-go"-Kriterium vermuten.		
	kürzest mögliche Bauzeit	normale Bauzeit
Beispiel	60 % (Bauzeit kann um max. 40 % verringert werden)	100 %
		100 %

Abb. 6-22 Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 9c

Der Mittelwert, der Modus und auch der M-Schätzer liegen bei ca. 80,00 % und beschreiben damit eine 20 %ige Bauzeitverkürzung bezogen auf die normale Bauzeit. Ab dieser Grenze ist es, nach Angaben der ExpertInnen, im Hinblick auf Kosten und Qualität, nicht mehr sinnvoll, die Bauzeit weiter zu verkürzen.

Lfd. Nr.	Parameter	Maximale Bauzeitverkürzung
0	A	B
1	n	27,00
2	Mittelwert	80,00
3	Standardfehler des MW	1,81
4	Standardabweichung	9,41
5	Variationskoeffizient	11,76 %
6	Median	80,00
7	MAD	5,00
8	robuster Variationskoeffizient (basierend auf Median)	6,25 %
9	Modus	80,00
10	Minimum	60,00
11	Maximum	95,00
12	Spannweite	35,00
13	Schiefe	-0,45
14	M-Schätzer (H12 (80 %))	80,47
15	Standardabweichung (H12 (80 %))	9,79
16	robuster Variationskoeffizient (basierend auf M-Schätzer)	12,17 %
17	Normalverteilung (Shapiro-Wilk, $p < 0,05$ )	Ja

Tab. 6-8 Deskriptive Darstellung der Daten zur maximale sinnvollen Bauzeitverkürzung

Der in Abb. 6-23 dargestellte Violinplot zeigt eine große Anzahl der Nennungen im Bereich von 80,00 bis 90,00 %. Dies bedeutet, dass bereits bei geringer Unterschreitung der normalen Bauzeit ein starker Anstieg der Kosten bzw. ein Rückgang der Ausführungsqualität erwartet wird. Es sind keine Ausreißer oder Extremwerte in der Darstellung des Violinplots zu erkennen.



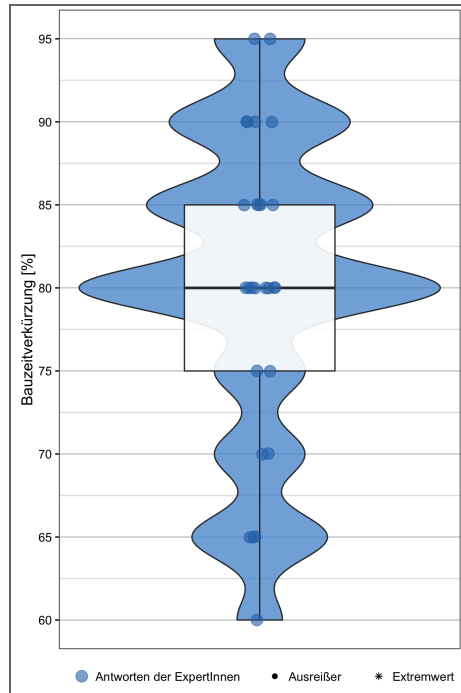


Abb. 6-23 Maximal sinnvolle Bauzeitverkürzung

Für eine zusammenfassende Darstellung und als Kontrolle der bisherigen Antworten zum Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit, wurden die ExpertInnen gebeten den vermuteten Kostenverlauf händisch in ein Diagramm einzuzichnen (siehe Abb. 6-24).

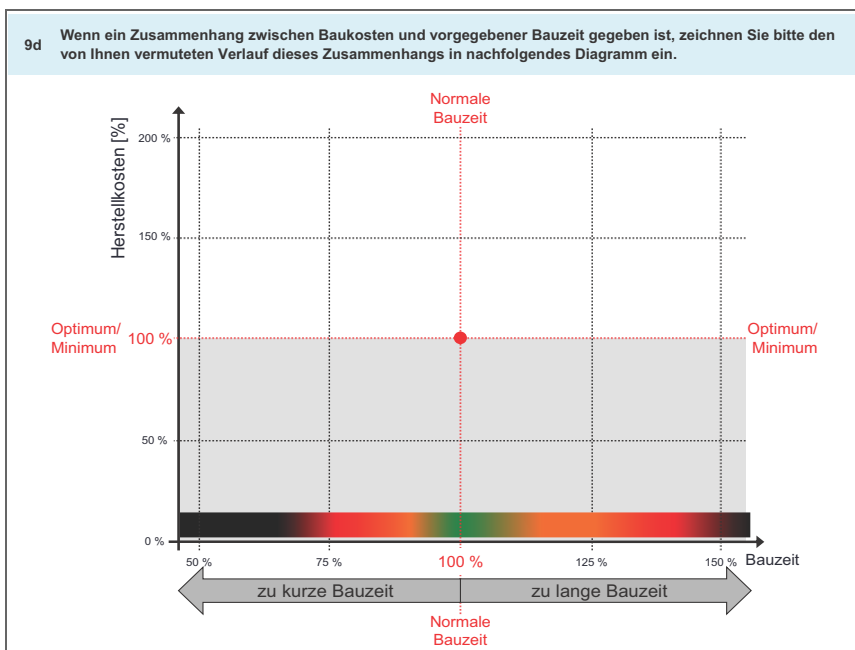


Abb. 6-24 Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 9d

Die so erhobenen Kurvenverläufe wurden in ein Zeichenprogramm (AutoCAD) übertragen und entsprechend skaliert, um quantitative Werte für den Kostenverlauf in Abhängigkeit der vorgegeben Bauzeit erheben zu können. Dazu wurden einzelne Werte für eine zu kurze Bauzeit bei 50 %, 60 %, 70 %, 75 %, 80 % und 90 % sowie für eine zu lange Bauzeit bei 110 %, 120 %, 125 %, 130 %, 140 % und 150 % erhoben und auf ganzzahlige Werte gerundet.<sup>41</sup>

Mit den ermittelten Werten konnte in weiterer Folge eine deskriptive Datenanalyse (siehe Tab. 6-9 und Tab. 6-10), sowie die Darstellung der Daten in Form von Violinplots (siehe Abb. 6-25) erfolgen. Weiters werden die Mittelwerte und M-Schätzer für eine Trendanalyse herangezogen.

Lfd. Nr.	Parameter	Zu kurze Bauzeit					
		50 %	60 %	70 %	75 %	80 %	90 %
0	A	B	C	D	E	F	G
1	n	18,00	23,00	26,00	26,00	27,00	27,00
2	Mittelwert	180,28	163,26	143,46	132,23	125,44	110,48
3	Standardfehler des MW	5,54	5,73	5,24	4,78	4,73	2,95
4	Standardabweichung	23,50	27,47	26,71	24,38	24,58	15,33
5	Variationskoeffizient	13,03 %	16,82 %	18,62 %	18,44 %	19,59 %	13,87 %
6	Median	185,00	163,00	138,00	123,50	116,00	105,00
7	MAD	15,00	20,00	12,50	7,50	5,00	3,00
8	robuster Variationskoeffizient (basierend auf Median)	8,11 %	12,27 %	9,06 %	6,07 %	4,31 %	2,86 %
9	Modus	200,00	163,00	140,00	118,00	112,00	102,00
10	Minimum	124,00	116,00	110,00	107,00	105,00	102,00
11	Maximum	201,00	222,00	218,00	200,00	199,00	171,00
12	Spannweite	77,00	106,00	108,00	93,00	94,00	69,00
13	Schiefe	-1,32	0,18	1,27	1,84	1,91	2,93
14	M-Schätzer (H12 (80 %))	183,81	162,74	139,37	127,33	119,04	106,1
15	Standardabweichung (H12 (80 %))	19,50	30,54	21,99	16,03	12,79	5,01
16	robuster Variationskoeffizient (basierend auf M-Schätzer)	10,61 %	18,76 %	15,78 %	12,59 %	10,74 %	4,73 %
17	Normalverteilung (Shapiro-Wilk, p < 0,05)	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein

Tab. 6-9 Deskriptive Darstellung der Daten für den Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit – zu kurze Bauzeit

Lfd. Nr.	Parameter	Zu lange Bauzeit					
		110 %	120 %	125 %	130 %	140 %	150 %
0	A	B	C	D	E	F	G
1	n	27,00	27,00	27,00	27,00	26,00	24,00
2	Mittelwert	103,89	110,00	113,85	118,78	129,96	139,21
3	Standardfehler des MW	0,92	1,59	1,91	2,29	3,49	3,20
4	Standardabweichung	4,77	8,27	9,91	11,91	17,79	15,67
5	Variationskoeffizient	4,60 %	7,52 %	8,71 %	10,03 %	13,69 %	11,26 %
6	Median	103,00	110,00	114,00	117,00	127,00	139,00
7	MAD	2,00	4,00	4,00	6,00	7,00	9,00
8	robuster Variationskoeffizient (basierend auf Median)	1,94 %	3,64 %	3,51 %	5,13 %	5,51 %	6,47 %
9	Modus	102,00	111,00	114,00	117,00	127,00	139,00
10	Minimum	96,00	94,00	95,00	96,00	102,00	112,00
11	Maximum	122,00	140,00	150,00	158,00	183,00	177,00
12	Spannweite	26,00	46,00	55,00	62,00	81,00	65,00
13	Schiefe	2,41	1,82	1,86	1,37	1,49	0,48
14	M-Schätzer (H12 (80 %))	103,15	109,1	112,78	117,28	126,86	138,41
15	Standardabweichung (H12 (80 %))	2,48	5,28	6,55	8,54	11,73	15,41
16	robuster Variationskoeffizient (basierend auf M-Schätzer)	2,41 %	4,84 %	5,81 %	7,29 %	9,25 %	11,14 %
17	Normalverteilung (Shapiro-Wilk, p < 0,05)	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja

Tab. 6-10 Deskriptive Darstellung der Daten für den Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit – zu lange Bauzeit

Es ist erkennbar, dass im Zuge einer Verkürzung der Bauzeit die Kosten höher eingeschätzt werden als bei einer Verlängerung der Bauzeit. Die Standardabweichung steigt mit zunehmender Abweichung von der normalen Bauzeit (= 100 %) tendenziell an. Wird diese ins Verhältnis zum Mittelwert gesetzt, was einen direkten Vergleich erlaubt, ist anhand der Variationskoeffizienten erkennbar, dass die Streuung bei einer zu langen Bauzeit etwas geringer als bei einer zu kurzen Bauzeit ist. Hier scheinen sich die Expert-

<sup>41</sup> Eine genauere Auswertung wird aufgrund der händischen Skizzen und der damit in Zusammenhang stehenden Messungenauigkeit als nicht sinnvoll erachtet.

Innen in ihren Einschätzungen tendenziell näher zu sein. Die Standardfehler des Mittelwerts deuten auf eine relativ präzise Schätzung bezogen auf alle prozentuellen Veränderungen (zu kurze sowie zu lange Bauzeit) hin. Die Schiefe nimmt hier positive Werte (bis auf eine 50 %ige Bauzeitverkürzung) an, was inhaltlich bedeutet, dass die meisten Nennungen im unteren Wertebereich der Verteilungen abgegeben wurden.

Eine Analyse der Violinplots (siehe Abb. 6-25) zeigt, dass sowohl bei einer zu kurzen als auch bei einer zu langen Bauzeit einige Ausreißer und Extremwerte beobachtet werden können.

Konkret liegen bei einer Bauzeit von 50 % ein Ausreißer, bei 70 % zwei Ausreißer, bei 75 % zwei Ausreißer<sup>42</sup>, bei 80 % drei Ausreißer und ein Extremwert, bei 90 % ein Ausreißer und zwei Extremwerte, bei 110 % bis 140 % jeweils zwei Ausreißer und ein Extremwert sowie ein Ausreißer bei 150 % vor, weshalb sich hier eine Anwendung des M-Schätzers H12 mit einer vollen Gewichtung von ca. 80 % der Daten empfiehlt, um plausible Werte für die Praxis generieren zu können.

Aus den Violinplots ist auch ersichtlich, dass einer/eine der Befragten bei einer zu langen Bauzeit (im Bereich von 110 bis 130 % auf der Abszisse) die Baukosten unter 100 % angegeben hat. Dies wurde damit begründet, dass oft erst im Laufe des Projekts erkannt wird, dass die Bauzeit ausreichend oder sogar zu lange ist und dann Kapazitäten, die sich auf die Baustelleneinkosten auswirken, bereits in einer früheren Phase (als ursprünglich geplant) reduziert werden. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, handelt es sich bei diesen Angaben um Ausreißer, die nur mit sehr geringem Gewicht in die Bildung eines robusten Mittelwertschätzers (M-Schätzer nach Huber) einfließen.

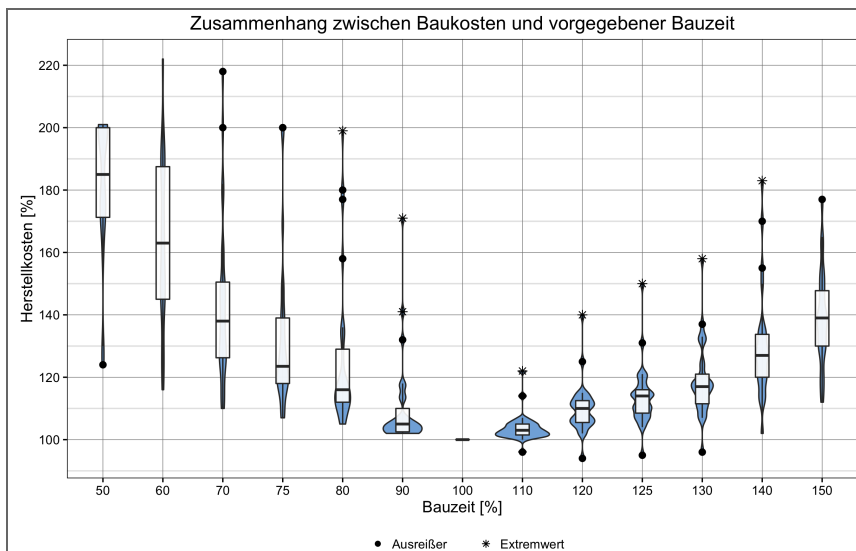


Abb. 6-25 Violinplots für den Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit

<sup>42</sup> Zwei identische Nennungen bei 200 %.

Die arithmetischen Mittelwerte der ExpertInnenbefragung sind als Trendlinien im Diagramm der Abb. 6-26 abgebildet (Kurven mit der Beschriftung: „Zusammenhang – Baukosten und Bauzeit – Mittelwert-Trendlinie – zu kurze Bauzeit“ und „Zusammenhang – Baukosten und Bauzeit – Mittelwert-Trendlinie – zu lange Bauzeit“). Auf der vertikalen Achse sind die Baukosten in Prozent dargestellt. Die vorgegebene Bauzeit ist auf der Abszisse aufgetragen. Bei 100 % vorgegebener Bauzeit ist die normale Bauzeit mit den niedrigsten Kosten gegeben. Damit die vorhandenen Ausreißer und Extremwerte das Ergebnis nicht verzerren, wurde die M-Schätzer-Methode nach Huber angewendet. Konkret wurde der M-Schätzer H12 ermittelt. Die dazugehörigen Trendlinien für die Aufwandswerterhöhung werden im Diagramm mit „Zusammenhang – Baukosten und Bauzeit – M-Schätzer-Trendlinie – zu kurze Bauzeit“ und „Zusammenhang – Baukosten und Bauzeit – M-Schätzer-Trendlinie – zu lange Bauzeit“ bezeichnet. Die Kurven der Mittelwerte und der M-Schätzer verlaufen besonders bei zu langer Bauzeit sehr ähnlich. Bei zu kurzer Bauzeit zeigt sich aber, dass die Trendlinie der M-Schätzer durchwegs unter jener des arith. Mittelwerts liegt. Erst bei einer Bauzeit von ca. 62 % kommt es zu einem Schnittpunkt der beiden Kurven. Der größte Abstand zwischen den Trendlinien ergibt sich bei einer 20 %igen Bauzeitverkürzung (entspricht einem Wert von 80 % auf der Abszisse) mit ca. 6,2 %.

Weiters sind in Abb. 6-26 die Grenzen der normalen Bauzeit sowie die maximal sinnvolle Bauzeitverkürzung – aus den Ergebnissen der vorangegangenen Fragen – in Form von vertikalen strichlierten Linien eingetragen.

Generell wird die Anwendung der Kurven, die nach der M-Schätzer-Methode ermittelt wurden, empfohlen. Ausgehend von der prozentuellen Bauzeit, die auf der Abszisse des Diagramms aufgetragen ist, wird eine Vertikale nach oben gezogen, bis ein Schnittpunkt mit der entsprechenden Kurve erzielt wird. Von diesem Schnittpunkt aus wird eine Horizontale eingezeichnet, bis sich ein Schnittpunkt mit der Ordinate ergibt. Der Wert für die Baukosten kann dann auf der vertikalen Achse abgelesen werden.

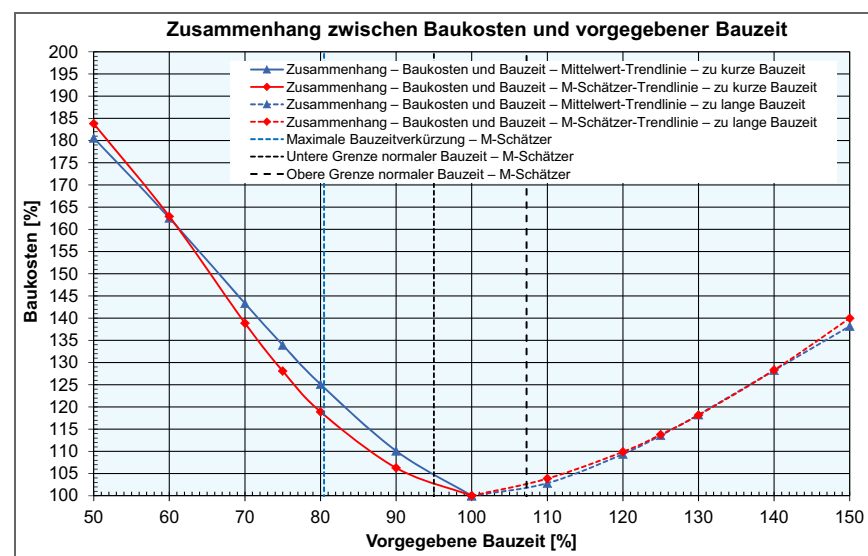


Abb. 6-26 Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit

Die prozentuellen Baukosten für eine zu kurze Bauzeit  $BK_{KURZ}$  [%], berechnet aus den M-Schätzern, werden nach Glg. (6-6) durch Einsetzen der prozentuellen Bauzeit  $BZ$  [%] ermittelt und gelten für:  $50 \% \leq BZ < 100 \%$ .

$$BK_{KURZ} = -0,00001643 \cdot BZ^4 + 0,00547385 \cdot BZ^3 - 0,64451015 \cdot BZ^2 + \quad (6-6) \\ + 30,02028847 \cdot BZ - 287,47775941$$

Die prozentuellen Baukosten für eine zu lange Bauzeit  $BK_{LANG}$  [%], berechnet aus den M-Schätzern, werden nach Glg. (6-7) durch Einsetzen der prozentuellen Bauzeit  $BZ$  [%] ermittelt und gelten für:  $100 \% < BZ \leq 150 \%$ .

$$BK_{LANG} = -0,000061 \cdot BZ^3 + 0,033191 \cdot BZ^2 - 4,609476 \cdot BZ + 290,488739 \quad (6-7)$$

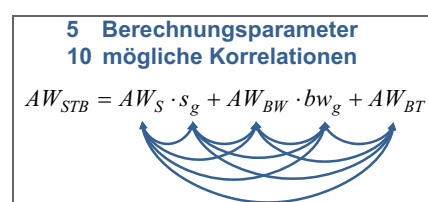
### 6.6.5 Korrelationen zwischen Parametern zur Berechnung des Gesamt-Aufwands werts der Stahlbetonarbeiten

Wie bereits in Abschnitt 5.11 gezeigt wurde, haben gegenseitige Abhängigkeit zwischen Berechnungsparametern bei der Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen durchaus Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Besonders die Streuung der Histogramme wird durch die Korrelationen beeinflusst.

Im Bereich der Stahlbetonarbeiten stellt der Gesamt-Aufwands wert eine zentrale Größe dar, die sowohl für die Baukosten- als auch für die Bauzeitermittlung in der Grobplanung essentiell ist. Der Gesamt-Aufwands wert der Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB}$  [Std/m<sup>3</sup>] wird nach Glg. (6-8) berechnet.

$$AW_{STB} = s_g \cdot AW_S + bw_g \cdot AW_{BW} + AW_{BT} \quad (6-8)$$

Zunächst müssen die mittleren Aufwands werte für das Schalen, Bewehren und Betonieren auf die gleiche Einheit umgerechnet werden. Dazu wird im ersten Term der Schalungsgrad  $s_g$  [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] mit dem mittleren Aufwands wert für das Schalen  $AW_S$  [Std/m<sup>2</sup>] multipliziert. Im zweiten Term erfolgt die Multiplikation des Bewehrungsgrads  $bw_g$  [t/m<sup>3</sup>] mit dem mittleren Aufwands wert für das Bewehren  $AW_{BW}$  [Std/t]. Werden diese beiden Terme mit dem mittleren Aufwands wert für das Betonieren  $AW_{BT}$  [Std/m<sup>3</sup>] aufsummiert, ergibt sich der Gesamt-Aufwands wert der Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB}$  [Std/m<sup>3</sup>]. Glg. (6-8) enthält insgesamt fünf Berechnungsparameter, von denen das Ergebnis des Gesamt-Aufwands werts abhängt. Zwischen diesen fünf Eingangsgrößen können insgesamt 10 mögliche Abhängigkeiten bzw. Korrelationen herrschen (siehe Abb. 6-27).



**Abb. 6-27** Mögliche Korrelationen zwischen den Berechnungsparametern des Gesamt-Aufwands werts der Stahlbetonarbeiten

Im Zuge der ExpertInnenbefragung wurden die TeilnehmerInnen befragt, wie sie die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern einschätzen. Es konnten dabei in 0,1-Schritten Korrelationen zwischen -1,0 und +1,0 gewählt werden (siehe Abb. 6-28 und Abb. 6-29). Korrelationen von 0,0 beschreiben eine völlige Unabhängigkeit zwischen den Berechnungsparametern. Eine Änderung des einen Inputs wirkt sich dabei nicht auf den anderen aus.

Zusätzlich wurden die positiven und negativen Abhängigkeiten textlich beschrieben, um bei den ExpertInnen das Verständnis zu erhöhen.

Neben den quantitativen Angaben zu den Korrelationen wurden Intervalle der möglichen Korrelationen auch mit Adjektiven beschrieben:

- 0,9 bis 1,0 – sehr stark
- 0,7 bis 0,8 – stark
- 0,5 bis 0,6 – mittel
- 0,3 bis 0,4 – schwach
- 0,1 bis 0,2 – sehr schwach

10 Wie schätzen Sie die Abhängigkeit (Korrelation) zwischen den folgenden Parametern ein?			
AW ... Aufwandswert			
<b>10a</b>	<b>Schalungsgrad [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] und Bewehrungsgrad [kg/m<sup>3</sup>]</b>		
Zutreffendes bitte ankreuzen! Nur eine Auswahl zulässig!			
<b>Positive Abhängigkeit</b>			
	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark
	0,9	<input type="checkbox"/>	
steigt der Schalungsgrad, steigt auch der Bewehrungsgrad bzw.	0,7	<input type="checkbox"/>	stark
	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel
steigt der Schalungsgrad, sinkt auch der Bewehrungsgrad	0,5	<input type="checkbox"/>	
	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach
	0,3	<input type="checkbox"/>	
	0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach
	0,1	<input type="checkbox"/>	
Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig
<b>Negative Abhängigkeit</b>			
	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach
	-0,2	<input type="checkbox"/>	
steigt der Schalungsgrad, sinkt der Bewehrungsgrad bzw.	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach
	-0,4	<input type="checkbox"/>	
sinkt der Schalungsgrad, steigt der Bewehrungsgrad	-0,5	<input type="checkbox"/>	mittel
	-0,6	<input type="checkbox"/>	
	-0,7	<input type="checkbox"/>	stark
	-0,8	<input type="checkbox"/>	
	-0,9	<input type="checkbox"/>	sehr stark
	-1,0	<input type="checkbox"/>	
keine Angabe <input type="checkbox"/>			
<b>10b</b>	<b>Schalungsgrad [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] und Aufwandswert für das Schalen [Std/m<sup>3</sup>]</b>		
Zutreffendes bitte ankreuzen! Nur eine Auswahl zulässig!			
<b>Positive Abhängigkeit</b>			
	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark
	0,9	<input type="checkbox"/>	
steigt der Schalungsgrad, steigt auch der AW für das Schalen	0,7	<input type="checkbox"/>	stark
	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel
steigt der Schalungsgrad, sinkt auch der AW für das Schalen	0,5	<input type="checkbox"/>	
	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach
	0,3	<input type="checkbox"/>	
	0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach
	0,1	<input type="checkbox"/>	
Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig
<b>Negative Abhängigkeit</b>			
	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach
	-0,2	<input type="checkbox"/>	
steigt der Schalungsgrad, sinkt der AW für das Schalen bzw.	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach
	-0,4	<input type="checkbox"/>	
sinkt der Schalungsgrad, steigt der AW für das Schalen	-0,5	<input type="checkbox"/>	mittel
	-0,6	<input type="checkbox"/>	
	-0,7	<input type="checkbox"/>	stark
	-0,8	<input type="checkbox"/>	
	-0,9	<input type="checkbox"/>	sehr stark
	-1,0	<input type="checkbox"/>	
keine Angabe <input type="checkbox"/>			
<b>10c</b>	<b>Schalungsgrad [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] und Aufwandswert für das Bewehren [Std/t]</b>		
Zutreffendes bitte ankreuzen! Nur eine Auswahl zulässig!			
<b>Positive Abhängigkeit</b>			
	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark
	0,9	<input type="checkbox"/>	
steigt der Schalungsgrad, steigt auch der AW für das Bewehren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark
	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel
steigt der Schalungsgrad, sinkt auch der AW für das Bewehren	0,5	<input type="checkbox"/>	
	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach
	0,3	<input type="checkbox"/>	
	0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach
	0,1	<input type="checkbox"/>	
Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig
<b>Negative Abhängigkeit</b>			
	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach
	-0,2	<input type="checkbox"/>	
steigt der Schalungsgrad, sinkt der AW für das Bewehren bzw.	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach
	-0,4	<input type="checkbox"/>	
sinkt der Schalungsgrad, steigt der AW für das Bewehren	-0,5	<input type="checkbox"/>	mittel
	-0,6	<input type="checkbox"/>	
	-0,7	<input type="checkbox"/>	stark
	-0,8	<input type="checkbox"/>	
	-0,9	<input type="checkbox"/>	sehr stark
	-1,0	<input type="checkbox"/>	
keine Angabe <input type="checkbox"/>			
<b>10d</b>	<b>Schalungsgrad [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] und Aufwandswert für das Betonieren [Std/m<sup>3</sup>]</b>		
Zutreffendes bitte ankreuzen! Nur eine Auswahl zulässig!			
<b>Positive Abhängigkeit</b>			
	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark
	0,9	<input type="checkbox"/>	
steigt der Schalungsgrad, steigt auch der AW für das Betonieren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark
	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel
steigt der Schalungsgrad, sinkt auch der AW für das Betonieren	0,5	<input type="checkbox"/>	
	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach
	0,3	<input type="checkbox"/>	
	0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach
	0,1	<input type="checkbox"/>	
Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig
<b>Negative Abhängigkeit</b>			
	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach
	-0,2	<input type="checkbox"/>	
steigt der Schalungsgrad, sinkt der AW für das Betonieren bzw.	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach
	-0,4	<input type="checkbox"/>	
sinkt der Schalungsgrad, steigt der AW für das Betonieren	-0,5	<input type="checkbox"/>	mittel
	-0,6	<input type="checkbox"/>	
	-0,7	<input type="checkbox"/>	stark
	-0,8	<input type="checkbox"/>	
	-0,9	<input type="checkbox"/>	sehr stark
	-1,0	<input type="checkbox"/>	
keine Angabe <input type="checkbox"/>			

Abb. 6-28 Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 10 – Teil 1

<p><b>10e</b> <b>Bewehrungsgrad [kg/m<sup>3</sup>] und Aufwandswert für das Schalen [Std/m<sup>2</sup>]</b> Zutreffendes bitte ankreuzen! Nur eine Auswahl zulässig!</p> <table border="1"> <tr><td><b>Positive Abhängigkeit</b></td><td>1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der Bewehrungsgrad, steigt auch der AW für das Schalen</td><td>0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der Bewehrungsgrad, sinkt auch der AW für das Schalen</td><td>0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>Parameter sind unabhängig</td><td>0,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>unabhängig</td></tr> <tr><td><b>Negative Abhängigkeit</b></td><td>-0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>-0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der Bewehrungsgrad, sinkt der AW für das Schalen</td><td>-0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>-0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der Bewehrungsgrad, steigt der AW für das Schalen</td><td>-0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-0,8</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>keine Angabe</td><td></td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> </table>	<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark		0,9	<input type="checkbox"/>		steigt der Bewehrungsgrad, steigt auch der AW für das Schalen	0,7	<input type="checkbox"/>	stark	bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der Bewehrungsgrad, sinkt auch der AW für das Schalen	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach		0,3	<input type="checkbox"/>			0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		0,1	<input type="checkbox"/>		Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig	<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		-0,2	<input type="checkbox"/>		steigt der Bewehrungsgrad, sinkt der AW für das Schalen	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach	bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der Bewehrungsgrad, steigt der AW für das Schalen	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark		-0,7	<input type="checkbox"/>			-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark		-0,9	<input type="checkbox"/>			-1,0	<input type="checkbox"/>		keine Angabe		<input type="checkbox"/>		<p><b>10f</b> <b>Bewehrungsgrad [kg/m<sup>3</sup>] und Aufwandswert für das Bewehren [Std/t]</b> Zutreffendes bitte ankreuzen! Nur eine Auswahl zulässig!</p> <table border="1"> <tr><td><b>Positive Abhängigkeit</b></td><td>1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der Bewehrungsgrad, steigt auch der AW für das Bewehren</td><td>0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der Bewehrungsgrad, sinkt auch der AW für das Bewehren</td><td>0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>Parameter sind unabhängig</td><td>0,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>unabhängig</td></tr> <tr><td><b>Negative Abhängigkeit</b></td><td>-0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>-0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der Bewehrungsgrad, sinkt der AW für das Bewehren</td><td>-0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>-0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der Bewehrungsgrad, steigt der AW für das Bewehren</td><td>-0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-0,8</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>keine Angabe</td><td></td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> </table>	<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark		0,9	<input type="checkbox"/>		steigt der Bewehrungsgrad, steigt auch der AW für das Bewehren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark	bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der Bewehrungsgrad, sinkt auch der AW für das Bewehren	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach		0,3	<input type="checkbox"/>			0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		0,1	<input type="checkbox"/>		Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig	<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		-0,2	<input type="checkbox"/>		steigt der Bewehrungsgrad, sinkt der AW für das Bewehren	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach	bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der Bewehrungsgrad, steigt der AW für das Bewehren	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark		-0,7	<input type="checkbox"/>			-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark		-0,9	<input type="checkbox"/>			-1,0	<input type="checkbox"/>		keine Angabe		<input type="checkbox"/>	
<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der Bewehrungsgrad, steigt auch der AW für das Schalen	0,7	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der Bewehrungsgrad, sinkt auch der AW für das Schalen	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
	0,3	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	0,1	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig																																																																																																																																																						
<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	-0,2	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der Bewehrungsgrad, sinkt der AW für das Schalen	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der Bewehrungsgrad, steigt der AW für das Schalen	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
	-0,7	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	-0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-1,0	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
keine Angabe		<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der Bewehrungsgrad, steigt auch der AW für das Bewehren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der Bewehrungsgrad, sinkt auch der AW für das Bewehren	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
	0,3	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	0,1	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig																																																																																																																																																						
<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	-0,2	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der Bewehrungsgrad, sinkt der AW für das Bewehren	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der Bewehrungsgrad, steigt der AW für das Bewehren	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
	-0,7	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	-0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-1,0	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
keine Angabe		<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
<p><b>10g</b> <b>Bewehrungsgrad [kg/m<sup>3</sup>] und Aufwandswert für das Betonieren [Std/m<sup>2</sup>]</b> Zutreffendes bitte ankreuzen! Nur eine Auswahl zulässig!</p> <table border="1"> <tr><td><b>Positive Abhängigkeit</b></td><td>1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der Bewehrungsgrad, steigt auch der AW für das Betonieren</td><td>0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der Bewehrungsgrad, sinkt auch der AW für das Betonieren</td><td>0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>Parameter sind unabhängig</td><td>0,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>unabhängig</td></tr> <tr><td><b>Negative Abhängigkeit</b></td><td>-0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>-0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der Bewehrungsgrad, sinkt der AW für das Betonieren</td><td>-0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>-0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der Bewehrungsgrad, steigt der AW für das Betonieren</td><td>-0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-0,8</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>keine Angabe</td><td></td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> </table>	<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark		0,9	<input type="checkbox"/>		steigt der Bewehrungsgrad, steigt auch der AW für das Betonieren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark	bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der Bewehrungsgrad, sinkt auch der AW für das Betonieren	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach		0,3	<input type="checkbox"/>			0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		0,1	<input type="checkbox"/>		Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig	<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		-0,2	<input type="checkbox"/>		steigt der Bewehrungsgrad, sinkt der AW für das Betonieren	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach	bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der Bewehrungsgrad, steigt der AW für das Betonieren	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark		-0,7	<input type="checkbox"/>			-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark		-0,9	<input type="checkbox"/>			-1,0	<input type="checkbox"/>		keine Angabe		<input type="checkbox"/>		<p><b>10h</b> <b>Aufwandswert für das Schalen [Std/m<sup>2</sup>] und Aufwandswert für das Bewehren [Std/t]</b> Zutreffendes bitte ankreuzen! Nur eine Auswahl zulässig!</p> <table border="1"> <tr><td><b>Positive Abhängigkeit</b></td><td>1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der AW für das Schalen, steigt auch der AW für das Bewehren</td><td>0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der AW für das Schalen, sinkt auch der AW für das Bewehren</td><td>0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>Parameter sind unabhängig</td><td>0,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>unabhängig</td></tr> <tr><td><b>Negative Abhängigkeit</b></td><td>-0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>-0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der AW für das Schalen, sinkt der AW für das Bewehren</td><td>-0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>-0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der AW für das Schalen, steigt der AW für das Bewehren</td><td>-0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-0,8</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>keine Angabe</td><td></td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> </table>	<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark		0,9	<input type="checkbox"/>		steigt der AW für das Schalen, steigt auch der AW für das Bewehren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark	bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der AW für das Schalen, sinkt auch der AW für das Bewehren	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach		0,3	<input type="checkbox"/>			0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		0,1	<input type="checkbox"/>		Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig	<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		-0,2	<input type="checkbox"/>		steigt der AW für das Schalen, sinkt der AW für das Bewehren	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach	bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der AW für das Schalen, steigt der AW für das Bewehren	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark		-0,7	<input type="checkbox"/>			-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark		-0,9	<input type="checkbox"/>			-1,0	<input type="checkbox"/>		keine Angabe		<input type="checkbox"/>	
<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der Bewehrungsgrad, steigt auch der AW für das Betonieren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der Bewehrungsgrad, sinkt auch der AW für das Betonieren	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
	0,3	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	0,1	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig																																																																																																																																																						
<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	-0,2	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der Bewehrungsgrad, sinkt der AW für das Betonieren	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der Bewehrungsgrad, steigt der AW für das Betonieren	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
	-0,7	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	-0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-1,0	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
keine Angabe		<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der AW für das Schalen, steigt auch der AW für das Bewehren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der AW für das Schalen, sinkt auch der AW für das Bewehren	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
	0,3	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	0,1	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig																																																																																																																																																						
<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	-0,2	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der AW für das Schalen, sinkt der AW für das Bewehren	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der AW für das Schalen, steigt der AW für das Bewehren	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
	-0,7	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	-0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-1,0	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
keine Angabe		<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
<p><b>10i</b> <b>Aufwandswert für das Schalen [Std/m<sup>2</sup>] und Aufwandswert für das Betonieren [Std/m<sup>2</sup>]</b> Zutreffendes bitte ankreuzen! Nur eine Auswahl zulässig!</p> <table border="1"> <tr><td><b>Positive Abhängigkeit</b></td><td>1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der AW für das Schalen, steigt auch der AW für das Betonieren</td><td>0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der AW für das Schalen, sinkt auch der AW für das Betonieren</td><td>0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>Parameter sind unabhängig</td><td>0,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>unabhängig</td></tr> <tr><td><b>Negative Abhängigkeit</b></td><td>-0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>-0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der AW für das Schalen, sinkt der AW für das Betonieren</td><td>-0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>-0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der AW für das Schalen, steigt der AW für das Betonieren</td><td>-0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-0,8</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>keine Angabe</td><td></td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> </table>	<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark		0,9	<input type="checkbox"/>		steigt der AW für das Schalen, steigt auch der AW für das Betonieren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark	bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der AW für das Schalen, sinkt auch der AW für das Betonieren	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach		0,3	<input type="checkbox"/>			0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		0,1	<input type="checkbox"/>		Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig	<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		-0,2	<input type="checkbox"/>		steigt der AW für das Schalen, sinkt der AW für das Betonieren	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach	bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der AW für das Schalen, steigt der AW für das Betonieren	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark		-0,7	<input type="checkbox"/>			-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark		-0,9	<input type="checkbox"/>			-1,0	<input type="checkbox"/>		keine Angabe		<input type="checkbox"/>		<p><b>10j</b> <b>Aufwandswert für das Bewehren [Std/t] und Aufwandswert für das Betonieren [Std/m<sup>2</sup>]</b> Zutreffendes bitte ankreuzen! Nur eine Auswahl zulässig!</p> <table border="1"> <tr><td><b>Positive Abhängigkeit</b></td><td>1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der AW für das Bewehren, steigt auch der AW für das Betonieren</td><td>0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der AW für das Bewehren, sinkt auch der AW für das Betonieren</td><td>0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>Parameter sind unabhängig</td><td>0,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td>unabhängig</td></tr> <tr><td><b>Negative Abhängigkeit</b></td><td>-0,1</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr schwach</td></tr> <tr><td></td><td>-0,2</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>steigt der AW für das Bewehren, sinkt der AW für das Betonieren</td><td>-0,3</td><td><input type="checkbox"/></td><td>schwach</td></tr> <tr><td>bzw.</td><td>-0,4</td><td><input type="checkbox"/></td><td>mittel</td></tr> <tr><td>sinkt der AW für das Bewehren, steigt der AW für das Betonieren</td><td>-0,6</td><td><input type="checkbox"/></td><td>stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,7</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-0,8</td><td><input type="checkbox"/></td><td>sehr stark</td></tr> <tr><td></td><td>-0,9</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-1,0</td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> <tr><td>keine Angabe</td><td></td><td><input type="checkbox"/></td><td></td></tr> </table>	<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark		0,9	<input type="checkbox"/>		steigt der AW für das Bewehren, steigt auch der AW für das Betonieren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark	bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der AW für das Bewehren, sinkt auch der AW für das Betonieren	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach		0,3	<input type="checkbox"/>			0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		0,1	<input type="checkbox"/>		Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig	<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach		-0,2	<input type="checkbox"/>		steigt der AW für das Bewehren, sinkt der AW für das Betonieren	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach	bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel	sinkt der AW für das Bewehren, steigt der AW für das Betonieren	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark		-0,7	<input type="checkbox"/>			-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark		-0,9	<input type="checkbox"/>			-1,0	<input type="checkbox"/>		keine Angabe		<input type="checkbox"/>	
<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der AW für das Schalen, steigt auch der AW für das Betonieren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der AW für das Schalen, sinkt auch der AW für das Betonieren	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
	0,3	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	0,1	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig																																																																																																																																																						
<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	-0,2	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der AW für das Schalen, sinkt der AW für das Betonieren	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der AW für das Schalen, steigt der AW für das Betonieren	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
	-0,7	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	-0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-1,0	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
keine Angabe		<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
<b>Positive Abhängigkeit</b>	1,0	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der AW für das Bewehren, steigt auch der AW für das Betonieren	0,7	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
bzw.	0,6	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der AW für das Bewehren, sinkt auch der AW für das Betonieren	0,4	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
	0,3	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	0,2	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	0,1	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
Parameter sind unabhängig	0,0	<input type="checkbox"/>	unabhängig																																																																																																																																																						
<b>Negative Abhängigkeit</b>	-0,1	<input type="checkbox"/>	sehr schwach																																																																																																																																																						
	-0,2	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
steigt der AW für das Bewehren, sinkt der AW für das Betonieren	-0,3	<input type="checkbox"/>	schwach																																																																																																																																																						
bzw.	-0,4	<input type="checkbox"/>	mittel																																																																																																																																																						
sinkt der AW für das Bewehren, steigt der AW für das Betonieren	-0,6	<input type="checkbox"/>	stark																																																																																																																																																						
	-0,7	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-0,8	<input type="checkbox"/>	sehr stark																																																																																																																																																						
	-0,9	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
	-1,0	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							
keine Angabe		<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																							

Abb. 6-29 Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 10 – Teil 2

Korrelationen werden üblicherweise durch die Analyse von vorhandenen Daten ermittelt. Im Baubetrieb und der Bauwirtschaft liegt eine solche Datenbasis meist nicht vor, die Zusammenhänge zwischen einzelnen Berechnungsparametern sind aber durchaus vorhanden und teilweise aufgrund der baubetrieblichen oder bauwirtschaftlichen Charakteristik nachvollziehbar. Mit dieser Frage wurde eruiert, ob sich ExpertInnen überhaupt in der Lage sehen, Werte für Korrelationen einzuschätzen und anzugeben. Die ExpertInnen wurden im Zuge der Fragebogenerörterung auch gebeten Gründe für die Wahl der jeweiligen Korrelationen anzugeben, um zu prüfen, ob die Fragen richtig beantwortet wurden und ob die Argumentationen den jeweiligen Angaben entsprechen.

Von den ExpertInnen wurden für die abgefragten Abhängigkeiten überwiegend positive Korrelationen angegeben. Demonstrative Gründe für die Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern werden nachfolgend angeführt:

#### **Schalungsgrad [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ] und Bewehrungsgrad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]**

Der Zusammenhang zwischen Schalungs- und Bewehrungsgrad wird als positiv angesehen. Der Schalungsgrad beschreibt den Zusammenhang zwischen Schalungsfläche und Betonmenge und gibt damit Aufschluss über die Feingliedrigkeit eines Bauwerks oder Bauteils. Bei einer Änderung des Schalungsgrads wird von den ExpertInnen mehrheitlich auch eine gleichgerichtete Änderung des Bewehrungsgrads erwartet. Steigt demnach der Schalungsgrad, wird auch ein Anstieg des Bewehrungsgrads erwartet. Sinkt der Schalungsgrad, rechnen die ExpertInnen ebenfalls mit einem niedrigerem Bewehrungsgrad. Es wird also vermutet, dass feingliedrigere Bauteile grundsätzlich die Tendenz höherer Bewehrungsgrade aufweisen – und umgekehrt.

#### **Schalungsgrad [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ] und Aufwandswert für das Schalen [ $\text{Std}/\text{m}^2$ ]**

Bei feingliedrigeren Gebäuden/Gebäudeteilen/Bauteilen wird hinsichtlich der Stahlbetonarbeiten (hoher Schalungsgrad) tendenziell ein höherer Aufwand für das Schalen gesehen, als bei Konstruktionen mit einem niedrigen Schalungsgrad. Die Mehrheit der ExpertInnen gab hier einen mittleren positiven Zusammenhang an. Bei einem hohen Schalungsgrad steigt üblicherweise der Anteil an Passflächen und konventionell herzustellenden Schalungsteilen (Abschalungen, Aussparungen etc.), was mit einem höheren Aufwand verbunden ist.

#### **Schalungsgrad [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ] und Aufwandswert für das Bewehren [ $\text{Std}/\text{t}$ ]**

Ein hoher Anteil an Schalungsflächen erhöht in der Regel auch den Aufwand für das Bewehren, da mehr Bewehrungspositionen, mehr kompliziert gebogene Bewehrungsstäbe, weniger Mattenanteil, mehr Verbügelungen und insgesamt eine aufwändigere Bewehrungsführung erwartet wird.

#### **Schalungsgrad [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ] und Aufwandswert für das Betonieren [ $\text{Std}/\text{m}^3$ ]**

Auch zwischen dem Schalungsgrad und dem Aufwandswert für das Betonieren wird ein positiver Zusammenhang gesehen. Massive Bauteile, die einen geringen Schalungsgrad aufweisen, sind in der Regel leichter zu Betonieren als feingliedrigere Bauteile. Begründet wird dies durch evtl. vorhandene Aussparungen/Öffnungen, die das Einfüllen und Verdichten des Betons erschweren, und nicht zuletzt die Problematik der Steiggeschwindigkeit, die vor allem bei vertikalen Bauteilen maßgebend für die Betoniergeschwindigkeit und damit für den Aufwandswert beim Betonieren verantwortlich werden kann.

#### **Bewehrungsgrad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] und Aufwandswert für das Schalen [ $\text{Std}/\text{m}^2$ ]**

Ändert sich der Bewehrungsgrad, wird auch eine gleichgerichtete Änderung des Aufwandswerts für das Schalen vermutet. Ein steigender Bewehrungsgrad führt demnach tendenziell zu einem steigenden Aufwandswert für das Schalen. Begründet wird dies dadurch, dass es zu Schwierigkeiten beim Schließen der Schalung kommen kann (bei vertikalen Bauteilen), die



Abschalung im Bereich der Anschlussbewehrung mit größerem Aufwand verbunden ist und, dass zur Einhaltung der Betondeckung generell Nacharbeiten erforderlich werden können.

### **Bewehrungsgrad [kg/m<sup>3</sup>] und Aufwandswert für das Bewehren [Std/t]**

Ein sehr eindeutiges Ergebnis lieferte die Frage nach dem Zusammenhang zwischen dem Bewehrungsgrad und dem Aufwandswert für das Bewehren. Auch hier wird eine positive Korrelation vermutet, die dadurch begründet wird, dass bei einem hohen Bewehrungsgrad tendenziell mehr Bewehrungspositionen, kompliziertere Bewehrungspläne, eine dichtere Bewehrungsführung und ein größerer Aufwand beim Ausbessern von Verlegefehlern vermutet werden.

### **Bewehrungsgrad [kg/m<sup>3</sup>] und Aufwandswert für das Betonieren [Std/m<sup>3</sup>]**

Sinkt der Bewehrungsgrad, sinkt in der Regel auch der Aufwand für das Betonieren, da genügend Einfüllöffnungen vorhanden sind, das Verdichten des Betons leichter vonstatten geht und die Gefahr von hängenbleibenden Innenrüttlern geringer ist. Auch die Betonrezeptur (Größtkorn, Konsistenz etc.) ist bei geringeren Bewehrungsgraden nicht so kritisch wie bei hochbewehrten Bauteilen.

### **Aufwandswert für das Schalen [Std/m<sup>2</sup>] und Aufwandswert für das Bewehren [Std/t]**

Auch zwischen dem Aufwandswert für das Schalen und dem Aufwandswert für das Bewehren wird ein leicht positiver Zusammenhang vermutet. Tritt ein höherer Aufwand für das Schalen ein, kommt es tendenziell auch zu einer Erhöhung des Aufwandswerts für das Bewehren. Die ExpertInnen begründeten ihre Angaben damit, dass sie auch

- zwischen dem Schalungsgrad und dem Bewehrungsgrad,
- zwischen dem Schalungsgrad und den Aufwandswerten für Schalen und Bewehren sowie
- zwischen dem Bewehrungsgrad und den Aufwandswerten für das Schalen und Bewehren

positive Abhängigkeiten vermutet haben, und dass für die Korrelation zwischen den Aufwandswerten für das Schalen und Bewehren damit auch ein positiver Wert zu erwarten wäre.

### **Aufwandswert für das Schalen [Std/m<sup>2</sup>] und Aufwandswert für das Betonieren [Std/m<sup>3</sup>]**

Auch zwischen diesen beiden Aufwandswerten wird ein ähnlich positiver Zusammenhang mit ähnlicher Argumentation wie zwischen den Aufwandswerten für das Schalen und Bewehren angegeben. Steigt der Schalungsgrad, wird damit ein höherer Aufwandswert für das Schalen und auch für das Betonieren vermutet. Das Gleiche gilt bei einem Anstieg des Bewehrungsgrads. Im Umkehrschluss wird auch zwischen den Aufwandswerten für das Schalen und Betonieren ein positiver Zusammenhang vermutet.

### Aufwandswert für das Bewehren [Std/t] und Aufwandswert für das Betonieren [Std/m<sup>3</sup>]

Da die Korrelation zwischen Bewehrungsgrad und den Aufwandswerten für das Bewehren und Betonieren bereits mehrheitlich positiv angegeben wurde, wird auch zwischen den beiden Aufwandswerten für das Bewehren und Betonieren eine positive Abhängigkeit vermutet.

Tab. 6-11 und Tab. 6-12 zeigen die deskriptive Statistik der erhobenen Korrelationen zwischen den einzelnen Berechnungsparametern. Insgesamt wurden von 27 ExpertInnen Angaben zu den abgefragten Abhängigkeiten getätigt, wobei nicht jeder/jede der Befragten für alle Zusammenhänge eine Antwort abgegeben hat.

Lfd. Nr.	Parameter	$s_g - bw_g$	$s_g - AW_S$	$s_g - AW_{BW}$	$s_g - AW_{BT}$	$bw_g - AW_S$
0	A	B	C	D	E	F
1	n	23,00	24,00	23,00	23,00	23,00
2	Mittelwert	0,51	0,45	0,46	0,50	0,37
3	Standardfehler des MW	0,06	0,08	0,07	0,06	0,07
4	Standardabweichung	0,26	0,41	0,31	0,29	0,33
5	Variationskoeffizient	51,98 %	89,49 %	68,58 %	57,16 %	91,04 %
6	Median	0,50	0,60	0,50	0,50	0,30
7	MAD	0,20	0,20	0,20	0,20	0,30
8	robuster Variationskoeffizient (basierend auf Median)	40,00 %	33,33 %	40,00 %	40,00 %	100,00 %
9	Modus	0,50	0,70	0,50	0,60	0,00
10	Minimum	0,00	-0,60	-0,20	0,00	0,00
11	Maximum	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	Spannweite	1,00	1,60	1,20	1,00	1,00
13	Schiefe	-0,49	-0,99	-0,43	-0,28	0,42
14	M-Schätzer (H12 (80 %))	0,53	0,49	0,47	0,51	0,35
15	Standardabweichung (H12 (80 %))	0,23	0,40	0,34	0,31	0,37
16	robuster Variationskoeffizient (basierend auf M-Schätzer)	43,16 %	80,19 %	73,00 %	59,71 %	105,67 %
17	Normalverteilung (Shapiro-Wilk, $p < 0,05$ )	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein

Tab. 6-11 Deskriptive Darstellung zu den Angaben der Korrelationen zwischen Parametern zur Berechnung des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten – Teil 1

Lfd. Nr.	Parameter	$bw_g - AW_{BW}$	$bw_g - AW_{BT}$	$AW_S - AW_{BW}$	$AW_S - AW_{BT}$	$AW_{BW} - AW_{BT}$
0	A	B	C	D	E	F
1	n	25,00	24,00	22,00	23,00	23,00
2	Mittelwert	0,65	0,59	0,36	0,32	0,53
3	Standardfehler des MW	0,08	0,04	0,07	0,06	0,05
4	Standardabweichung	0,41	0,20	0,33	0,29	0,24
5	Variationskoeffizient	63,65 %	34,08 %	93,58 %	91,32 %	45,43 %
6	Median	0,70	0,60	0,30	0,40	0,60
7	MAD	0,10	0,10	0,30	0,30	0,10
8	robuster Variationskoeffizient (basierend auf Median)	14,29 %	16,67 %	100,00 %	75,00 %	16,67 %
9	Modus	0,80	0,60	0,00	0,00	0,60
10	Minimum	-0,80	0,20	0,00	0,00	0,00
11	Maximum	1,00	0,90	1,00	1,00	1,00
12	Spannweite	1,80	0,70	1,00	1,00	1,00
13	Schiefe	-2,36	-0,35	0,32	0,45	-0,69
14	M-Schätzer (H12 (80 %))	0,73	0,60	0,35	0,31	0,55
15	Standardabweichung (H12 (80 %))	0,24	0,24	0,38	0,33	0,22
16	robuster Variationskoeffizient (basierend auf M-Schätzer)	33,06 %	39,63 %	110,55 %	105,67 %	40,29 %
17	Normalverteilung (Shapiro-Wilk, $p < 0,05$ )	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja

Tab. 6-12 Deskriptive Darstellung zu den Angaben der Korrelationen zwischen Parametern zur Berechnung des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten – Teil 2

Die Standardfehler der Mittelwerte nehmen relativ niedrige Werte an, womit tendenziell von einer erwartungsgetreuen Schätzung ausgegangen werden kann. Der Variationskoeffizient variiert zwischen ca. 34 % und 94 %. Die geringsten Variationskoeffizienten ergeben sich bei folgenden Zusammenhängen:

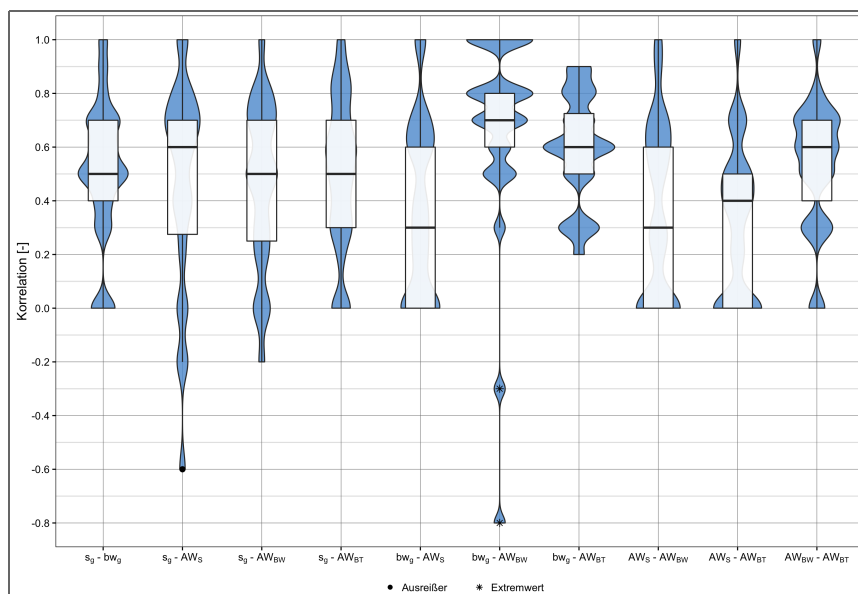
- Bewehrungsgrad  $bw_g$  und Aufwandswert für das Bewehren  $AW_{BW}$  (Tab. 6-12 – Spalte B)
- Bewehrungsgrad  $bw_g$  und Aufwandswert für das Betonieren  $AW_{BT}$  (Tab. 6-12 – Spalte C)
- Aufwandswert für das Bewehren  $AW_{BW}$  und Aufwandswert für das Betonieren  $AW_{BT}$  (Tab. 6-12 – Spalte F)
- Schalungsgrad  $s_g$  und Bewehrungsgrad  $bw_g$  (Tab. 6-11 – Spalte B)

Die Antworten weisen großteils eine linksschiefe Verteilung auf. Inhaltlich bedeutet dies, dass tendenziell eine Häufung der Antworten bei den höheren Korrelationswerten vorliegt.

Abb. 6-30 zeigt die Violinplots der ExpertInnenangaben zu den Korrelationen der Berechnungsparameter für die Ermittlung des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten. Es sind nur vereinzelt negative Korrelationswerte erkennbar, der überwiegende Teil der Angaben sind positive Korrelationen. Für einige Zusammenhänge wurde von einzelnen ExpertInnen auch angegeben, dass keine Abhängigkeiten vermutet werden ( $r = 0$ ).

Bei den Zusammenhängen zwischen  $bw_g - AW_S$ ,  $AW_S - AW_{BW}$  und  $AW_S - AW_{BT}$  sind aus Abb. 6-30 bimodale Verteilungen zu erkennen. Eine Häufung der Antworten erfolgt neben den positiven Korrelationswerten auch bei  $r = 0$ . Aus einer vertieften Analyse konnte kein Zusammenhang zwischen der Berufserfahrung und den Nennungen der Korrelationen bei dieser Frage festgestellt werden.

Es sind vereinzelt Extremwerte und Ausreißer zu erkennen, die den Mittelwert der Korrelationen entsprechend verzerren können. Es wird daher die Anwendung der M-Schätzer nach Huber empfohlen.



**Abb. 6-30** Korrelationen zwischen den Parametern des Gesamt-Aufwandswerts für Stahlbetonarbeiten

Zusätzlich wurden im Zuge der Analyse der ExpertInnenangaben jene Korrelationsmatrizen, die von den ExpertInnen vollständig angegeben wurden, auf Konsistenz überprüft. Von den insgesamt 22 vollständigen Angaben (alle 10 Korrelationskoeffizienten angegeben) wiesen 14 eine konsistente Matrix auf, mit denen ohne Anpassung eine Simulation durchgeführt hätte werden können.

Es hat sich also gezeigt, dass ExpertInnen durchaus in der Lage sind Korrelationskoeffizienten abzuschätzen und in Form einer konsistenten Matrix anzugeben. Diese Erhebung von Korrelationskoeffizienten anhand von ExpertInnenschätzungen sollte zwar nicht einer mathematischen Erhebung basierend auf erhobenen Daten vorgezogen werden, kann aber durchaus brauchbare Hinweise liefern, wenn keine (soliden) Daten vorliegen oder nicht erhoben werden können. Im Hintergrund sollten die Anwender immer die Grundlagen zur Anwendung von Korrelationen bei der Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen berücksichtigen und die Ergebnisse auf Plausibilität prüfen. Als Vergleichsrechnung kann immer eine Simulation mit unkorrelierten Parametern durchgeführt werden, um die Auswirkungen auf den Output zu prüfen.

Anhand der Ermittlung des Gesamt-Aufandswerts der Stahlbetonarbeiten wird mit einem Beispiel gezeigt, wie eine solche Gegenüberstellung erfolgen kann.

### Anwendungsbeispiel

Anhand der erhobenen M-Schätzer für die Korrelationen zwischen den Inputparametern zur Berechnung des Gesamt-Aufandswerts der Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB}$  wird mit einem Beispiel gezeigt, welchen Einfluss diese Korrelationen gegenüber unkorrelierten Parametern auf den Output aufweisen.

Es wird dazu der Gesamt-Aufandswert mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation (Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren – 50.000 Iterationen) berechnet. Die Inputparameter werden der Einfachheit halber mit Dreiecksverteilungen belegt. Die Eingabedaten (Minimum, erwarteter Wert und Maximum) für jeden der Inputparameter sind in Tab. 6-13 dargestellt.

Ldf. Nr.	Berechnungsparameter			Einheit	MIN	ERW	MAX
0	A	B	C	D	E	F	
1	Schalungsgrad	$S_{g,bwk}$	$m^2/m^3$	2,70	3,00	3,30	
2	Bewehrungsgrad	$bw_{g,bwk}$	$kg/m^3$	100,00	115,00	140,00	
3	Aufandswert für die Schalarbeiten	$AW_{S,MW}$	Std/ $m^2$	1,00	1,20	1,60	
4	Aufandswert für die Bewehrungsarbeiten	$AW_{BW,MW}$	Std/t	12,00	13,00	16,00	
5	Aufandswert für die Betonarbeiten	$AW_{BT,MW}$	Std/ $m^3$	0,90	1,00	1,30	

**Tab. 6-13** Eingabedaten für die Berechnung des Gesamt-Aufandswerts der Stahlbetonarbeiten

Das deterministische Berechnungsmodell für die Simulation entspricht Glg. (6-8). Die Berechnungen werden einmal mit unabhängigen Parametern ( $r = 0$ ) und einmal unter Berücksichtigung der Korrelationskoeffizienten, die im Zuge der ExpertInnenbefragung als M-Schätzer ermittelt wurden, durchgeführt. Die für das Beispiel angesetzte Korrelationsmatrix ist in Tab. 6-14 ersichtlich.

Korrelationen	$s_g$	$bw_g$	$AW_S$	$AW_{BW}$	$AW_{BT}$
$s_g$	1,00				
$bw_g$	0,53	1,00			
$AW_S$	0,49	0,35	1,00		
$AW_{BW}$	0,47	0,73	0,35	1,00	
$AW_{BT}$	0,51	0,60	0,31	0,55	1,00

Tab. 6-14 Korrelationsmatrix mit den M-Schätzern der ExpertInnenbefragung

In Abb. 6-31 ist zu erkennen, dass sich die Streuung des Gesamt-Aufwandswerts unter Einbeziehung der Korrelationen erhöht. Dies wird damit begründet, dass einerseits nur positive Korrelationen zum Einsatz kommen, andererseits in der deterministischen Berechnungsvorschrift lediglich Additionen und Multiplikationen vorkommen. Diese beiden Rechenoperationen in Kombination mit positiven Korrelationen bewirken eine Vergrößerung der Bandbreite möglicher Outputs (siehe auch Abschnitt 5.11 – Seite 178ff).

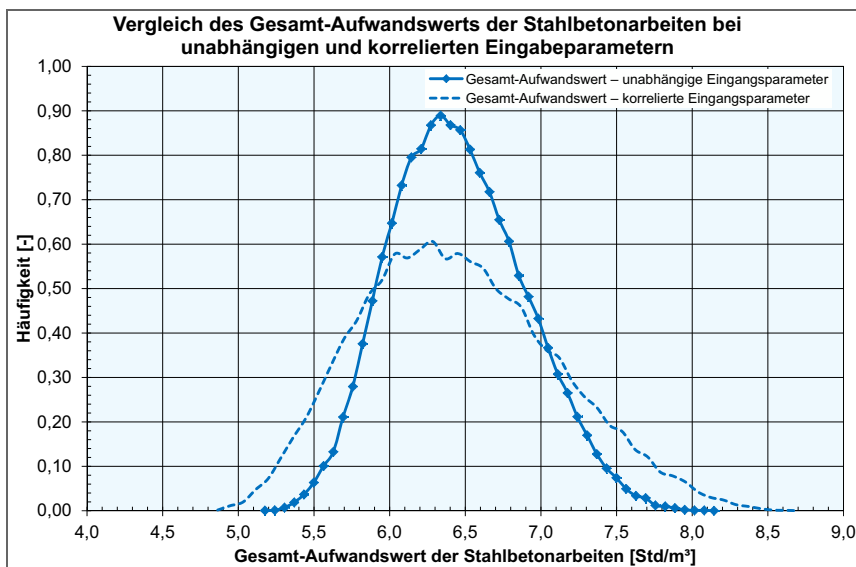


Abb. 6-31 Vergleich des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten bei unabhängigen und korrelierten Eingabeparametern

Eine unkorrelierte Betrachtung würde in diesem Fall hohe und niedrige Aufwandswerte zu gering gewichten und evtl. weiterführende Berechnungen verfälschen. Insgesamt zeigt sich hier bei korrelierten Inputs im Zuge der Simulation eine größere Bandbreite möglicher Ergebnisse.

Jene Verteilung, die für korrelierte Inputparameter berechnet wurde, wird in Kap. 8 (Seite 281ff) als Input für den Grund-Gesamt-Aufwandswert der probabilistischen Berechnungen verwendet.

## 6.7 Zusammenfassung

Anhand der durchgeführten ExpertInnenbefragung konnten neue Erkenntnisse erhoben bzw. vorhandenes Wissen über das gemeinsame Auftreten von Einzelproduktivitätsverlusten gesichert werden. Dazu wurden die häufigsten 2er, 3er und 4er Kombinationen für eine zu kurze Bauzeit und die häufigsten 2er und 3er Kombinationen für eine zu lange Bauzeit tabellarisch angeführt. Insgesamt gaben die ExpertInnen an, dass bei einer zu kurzen Bauzeit im Mittel mit zwei bis drei Produktivitätsverlusten zu rechnen ist.

Bei zu langer Bauzeit liegt dieser Wert mit ein bis zwei gemeinsam auftretenden Produktivitätsverlusten niedriger. Das Potential für das Auftreten von Produktivitätsverlusten wird damit bei einer zu kurz vorgegebenen Bauzeit als deutlich höher erachtet. Weiters wurde erhoben, in welcher Projektphase die jeweiligen Produktivitätsverluste vornehmlich erwartet werden. In der Anlaufphase wurden die meisten Nennungen für „zu kurze Planvorlaufzeiten und mangelnde Planungsqualität“ abgegeben. In der Auslaufphase werden häufig „ungeplante Wechsel des Einsatzorts“ angeführt.

In der Hauptbauphase ist das Potential für Produktivitätsverluste am größten. Hier wurden auch über alle Produktivitätsverluste die häufigsten Angaben getätigt. Die ExpertInnen begründeten dies damit, dass in der Hauptbauphase die meisten Ressourcen auf der Baustelle eingesetzt werden und sich damit gegenseitige Behinderungen bzw. längere Arbeitszeiten sowie zu geringe Gerätekapazitäten ergeben können.

Hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit konnten die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse auch durch die ExpertInnenbefragung bestätigt werden. Nahezu alle Befragten gaben an, dass sie einen „direkten“ oder zumindest „wesentlichen“ Zusammenhang zwischen der vorgegebenen Bauzeit und den Baukosten vermuten. Außerdem gab die Mehrheit an, dass eine zu kurze Bauzeit einen höheren Einfluss auf die Baukosten ausübt als eine zu lange Bauzeit.

Der Bereich der normalen Bauzeit (= 100 %) wird bezogen auf die M-Schätzer zwischen 95 % und 107,25 % vermutet. In diesem Bereich ist nur mit einem geringen Anstieg der Kosten zu rechnen. Hinsichtlich der kürzest möglichen Bauzeit gaben die ExpertInnen an, dass eine Verkürzung um ca. 20 % bezogen auf die normale Bauzeit noch sinnvoll möglich ist. Weitere Verkürzungen würden zu unverhältnismäßig großen Kostenerhöhungen führen. Die überwiegende Mehrheit der Befragten gab einen nichtlinearen Verlauf für den Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit an, wobei der Anstieg der Kosten bei einer zu kurzen Bauzeit tendenziell höher vermutet wird als bei einer zu langen Bauzeit.

Schließlich wurden die zehn Korrelationskoeffizienten zwischen den fünf Berechnungsparametern des Gesamt-Aufwandswerts für Stahlbetonarbeiten anhand einer Ratingskala abgefragt. Die ExpertInnen schätzten die Abhängigkeiten zwischen den Parametern überwiegend mit positiven Korrelationen ein. Die robusten Mittelwerte (M-Schätzer) der betrachteten Korrelationskoeffizienten wurden in diesem Kapitel präsentiert und anhand eines Berechnungsbeispiels angewendet. Die Berechnungsgleichung (deterministisches Berechnungsmodell) des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten

besteht dabei lediglich aus Additionen und Multiplikationen. Durch den Ansatz der durchwegs positiven Korrelationen erhöht sich damit die Spannweite der Ergebnisse gegenüber einer unabhängigen Betrachtung der Inputparameter. Durch die Vernachlässigung der Korrelationen ergibt sich eine Verringerung der berechneten Spannweite der Ergebnisse und damit auch eine Unterschätzung der vorhandenen Unsicherheiten.

Es konnte gezeigt werden, dass ExpertInnen durchaus in der Lage sind, Angaben zu Korrelationen zu tätigen und, dass der Großteil der vollständig angegebenen Korrelationskoeffizienten zu konsistenten Matrizen geführt hätte. Mit diesen Korrelationsmatrizen wären Simulationen im Softwareprogramm @Risk direkt durchführbar gewesen, ohne dass eine Anpassung erforderlich gewesen wäre.





## 7 Modellbildung

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Grundlagen der Modellierung sowie auf den Umgang mit Informationen eingegangen. Für die konkrete Aufgabenstellung – ein Berechnungsmodell zu entwickeln, das Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten berücksichtigt – wird zuerst der qualitative Wirkungszusammenhang der Modellkomponenten dargestellt. Weiters werden die qualitativen Zusammenhänge zwischen Produktivitätsverlusten und dem Ressourceneinsatz dargestellt. Für die Umsetzung des entwickelten qualitativen Modells in ein quantitatives Gleichungssystem werden in einem nächsten Schritt ein Lasten- sowie ein Pflichtenheft für die Definition des Anforderungsprofils erstellt und in tabellarischer Form aufgelistet.

Am Ende dieses Abschnitts wird auf die Möglichkeit von Optimierungsverfahren durch den Einsatz probabilistischer Simulationen eingegangen und eine Zusammenfassung des Kapitels vorgenommen.

### 7.1 Grundlagen zur Modellierung

Aussagen über die Zukunft auf Basis von Prognosen erfordern Berechnungsmodelle, die im Spannungsfeld von Praxiserfahrungen und praktischer Anwendbarkeit, theoretischen Grundlagen, erforderlichen Abstraktionen und Vereinfachungen sowie der mathematischen Umsetzung entwickelt werden müssen.

Die Abbildung der Realität durch ein (vereinfachtes) Berechnungsmodell stellt dabei einen induktiven Denkprozess dar, der es ermöglicht, sich mit dem Untersuchungsgegenstand indirekt auseinanderzusetzen und diesen zu analysieren.<sup>1</sup>

Im Rahmen einer methodischen Vorgehensweise werden Modelle für bestimmte Zwecke eingesetzt:<sup>2</sup>

- Beschreibung
- Erklärung und Demonstration
- Prognose
- Mathematische Berechnung
- Experimentelle Untersuchung
- Planung und Gestaltung
- Verbesserung

Reale Systeme können grundsätzlich weder vollständig identifiziert noch gänzlich repräsentiert werden, weshalb eine Abgrenzung des realen Systems auf einzelne Ausschnitte meist unumgänglich ist.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Vgl. Töllner et al. (2010). Modelle und Modellierung – Terminologie, Funktionen und Nutzung, S. 5

<sup>2</sup> Vgl. Töllner et al. (2010). Modelle und Modellierung – Terminologie, Funktionen und Nutzung, S. 8

Allgemein zeichnen sich Modelle durch drei Hauptkriterien aus:<sup>4</sup>

- **Abbildungsmerkmal**  
Modelle sind Abbildungen realer oder gedachter Systeme bzw. Originale (soziale, technische oder sozio-technische Systeme).
- **Verkürzungsmerkmal/Vereinfachung**  
Modelle erfassen nicht alle Attribute des abgebildeten Systems, sondern nur jene, die für die Zweckerfüllung erforderlich sind.
- **Pragmatisches Merkmal**  
Die Verbindung zwischen Modell und Originalen ist zweckgebunden, wobei das Modell das Original für begrenzte Zeitintervalle ersetzt. Die Nutzung des Modells ist auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen eingeschränkt.

Für den Einsatz von (Berechnungs-)Modellen ergibt sich ein Beziehungsdreieck zwischen dem Modellsubjekt (Entwickler bzw. Anwender), dem Modell selbst und dem Modellobjekt bzw. dem realen System (siehe Abb. 7-1). Das Modellsubjekt verfolgt dabei hinsichtlich des Modellobjekts konkrete Ziele (z.B. Prognose der Baukosten) und entwickelt bzw. nutzt dafür ein Modell. Dieses Modell repräsentiert in weiterer Folge das Modellobjekt in idealisierter bzw. abstrahierter Form.

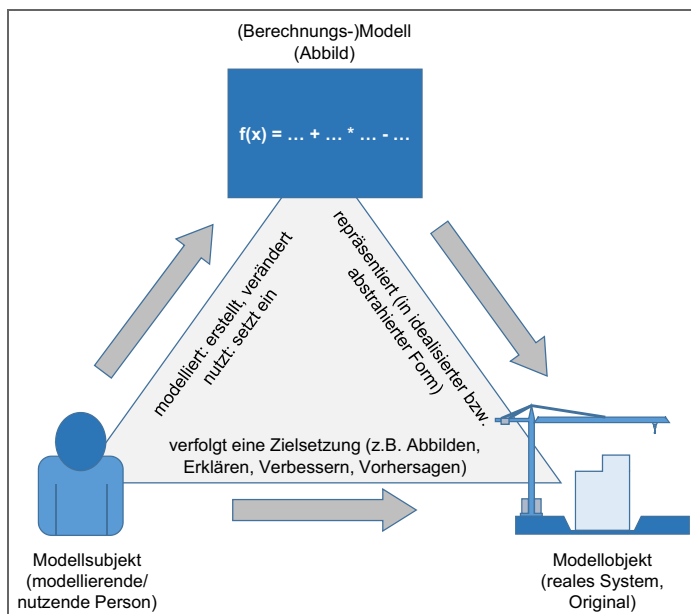


Abb. 7-1 Beziehungsdreieck<sup>5</sup>

Für die Klassifizierung unterschiedlicher Modelle im Bereich der Betriebswirtschaften, der Ingenieurwissenschaften sowie im interdisziplinären Kontext wird an dieser Stelle auf Jockisch/Rosendahl<sup>6</sup> verwiesen. In dem Beitrag werden Klassifikationen unterschiedlicher Autoren angeführt und diskutiert.

<sup>3</sup> Vgl. Töllner et al. (2010). Modelle und Modellierung – Terminologie, Funktionen und Nutzung. S. 11f

<sup>4</sup> Vgl. Töllner et al. (2010). Modelle und Modellierung – Terminologie, Funktionen und Nutzung. S. 8f

<sup>5</sup> Vgl. Töllner et al. (2010). Modelle und Modellierung – Terminologie, Funktionen und Nutzung. S. 10

<sup>6</sup> Jockisch/Rosendahl (2010). Klassifikation von Modellen. S. 23ff

Die Durchführung von Baukosten- und Bauzeitberechnungen erfordert eine Abstraktion der Realität bzw. der vorherrschenden Wirkungszusammenhänge durch ein Berechnungsmodell (schematische Vorgangsweise – siehe Abb. 7-2). Dieses bildet reale Abläufe ab, enthält dabei aber zwangsläufig Vereinfachungen. Im Zuge von „Schreibtischtests“<sup>7</sup> wird das Berechnungsmodell überarbeitet, erweitert und verbessert, um Verknüpfungs- und Modellfehler zu beheben. Mit Hilfe von Validierungen<sup>8</sup> kann die Anwendbarkeit des Berechnungsmodells auf die Realität überprüft werden. Erforderliche Kalibrierungen und Anpassungen sind das Ergebnis der Validierung.

Zur Erhöhung der Validität ist es zweckmäßig, mathematisch beschriebene Zusammenhänge (z.B. nichtlineare Kurvenverläufe für Produktivitätsverluste bzw. Aufwandswerterhöhungen – siehe Abschnitt 4.9), die aus der Praxis (z.B. ExpertInnenbefragungen) gewonnen werden konnten, in das Modell zu integrieren.

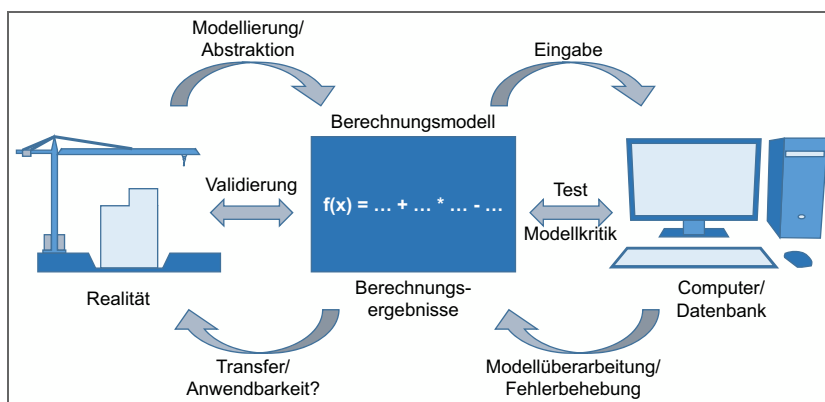


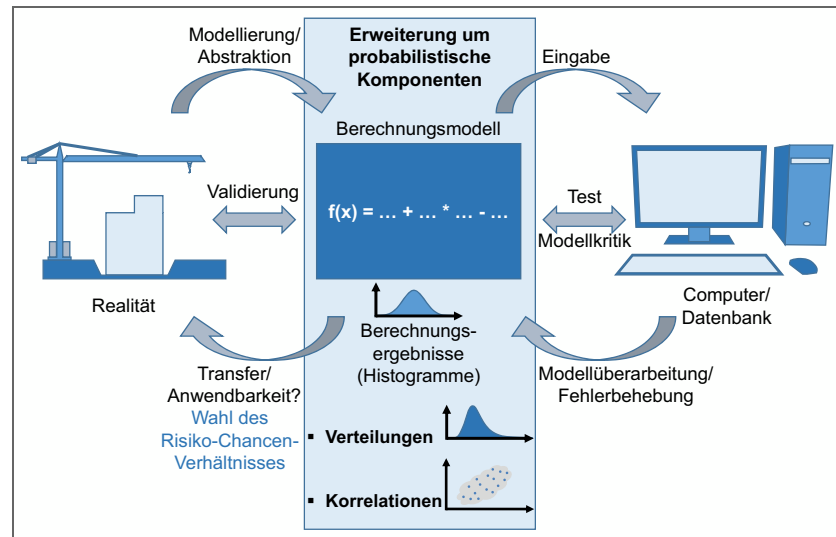
Abb. 7-2 Schematische Vorgangsweise zur Modellbildung

Um probabilistische Berechnungen (Monte-Carlo-Simulationen) durchführen und damit Unsicherheiten in den Berechnungen berücksichtigen zu können, ist eine Erweiterung des deterministischen Berechnungsmodells um probabilistische Komponenten erforderlich. Berechnungsparameter werden mit Bandbreiten bzw. mit konkreten Verteilungsfunktionen belegt. Zusätzlich ist die Definition von Korrelationen zwischen Eingabeparametern möglich, um Abhängigkeiten zu berücksichtigen (siehe Abb. 7-3).

Wesentlich bei der Anwendung eines probabilistischen Modells zur Entscheidungsvorbereitung ist die Wahl eines entsprechenden Chancen-Risiko-Verhältnisses, das durch die Festlegung auf einen konkreten deterministischen Wert innerhalb der ermittelten Bandbreite bestimmt wird.

<sup>7</sup> Als Schreibtischttest wird die Überprüfung eines Berechnungsalgorithmus bzw. einer Routine auf deren Richtigkeit bezeichnet. Es muss dafür ein deterministisches Berechnungsmodell vorliegen, bei dem die Ergebnisse für eine bestimmte Eingabe bekannt sind und auch überprüft werden können.

<sup>8</sup> Als Methodenvvalidierung wird der Nachweis über die Einsetzeignung einer analytischen Methode bezeichnet. Unter Validierung wird der Nachweis verstanden, dass ein Modell in seinem wesentlichen Verhalten mit dem Verhalten des Originals übereinstimmt.  
Vgl. Töllner et al. (2010). Modelle und Modellierung – Terminologie, Funktionen und Nutzung, S. 19



**Abb. 7-3** Schematische Vorgangsweise zur Modellbildung – inkl. Erweiterung des Modells um probabilistische Komponenten

Der Einsatz von Berechnungsmodellen bzw. die daraus gewonnenen Ergebnisse werden direkt von den Eingangswerten (Inputs) bestimmt.<sup>9</sup> Es gilt der Grundsatz: „garbage in = garbage out“. D.h. der Output einer Berechnung/Simulation kann nur so aussagekräftig, valide und brauchbar sein, wie die zugrunde gelegten Inputs. Der zweckmäßige und gewissenhafte Umgang mit Informationen ist in diesem Zusammenhang besonders wichtig.

## 7.2 Umgang mit Informationen

Für die Berechnung von Baukosten und Bauzeiten ist neben einem verlässlichen Berechnungsmodell – das die Möglichkeit Nichtlinearitäten und Unsicherheiten zu berücksichtigen bietet – auch eine belastbare Datenbasis erforderlich. Werden diese Daten durch einen entsprechenden Kontext angereichert, ergeben sich Informationen, die für den Informationsempfänger bzw. das Modellsjekt als Eingabe für entsprechende Berechnungen dienen.

Durch die Verknüpfung von Informationen und die Betrachtung der herrschenden Wirkungszusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern, ergeben sich Erkenntnisse und Wissen, welches entweder Bekanntes bestätigt oder Neues aufwirft.<sup>10</sup>

Für die probabilistische nichtlineare Berechnung von Baukosten und Bauzeiten sind für unsichere Eingangsparameter vor allem Informationen hinsichtlich der möglichen Bandbreiten oder Verteilungsfunktionen von Interesse. Interne Datenerhebungen bzw. historische Daten können hier als wertvolle Quelle für die Beurteilung möglicher Bandbreiten dienen. Sind genügend Daten vorhanden, können auch direkt aus diesen Daten Verteil-

<sup>9</sup> Vgl. Tautschnig/Frösch/Sander (2010). Erfahrungen mit probabilistischen Kostenermittlungen im Hochbau. S. 216

<sup>10</sup> Vgl. Brücher (2004). Leitfadens Wissensmanagement – Von der Anforderungsanalyse bis zur Einführung. S. 9ff

lungsfunktionen generiert („gefittet“) und für Simulationen angesetzt werden. Interne Daten sind dabei externen Quellen vorzuziehen, da hier unternehmens- bzw. projektbezogene Spezifika („weiche“ Faktoren, die nur mit erhöhtem Aufwand gesondert erhoben werden können – z.B.: Motivation, Leistungsbereitschaft, Teamgeist) in den erhobenen Daten enthalten sind. Externe Quellen (Literatur, Herstellerangaben etc.) können zur Plausibilisierung dienen. Generell ist vor der Verwendung entsprechender Informationen auf die Anwendbarkeit und die Randbedingungen – unter denen die Daten erhoben wurden – zu achten (siehe Abb. 7-4). Erforderliche Anpassungen sind dabei in Betracht zu ziehen.

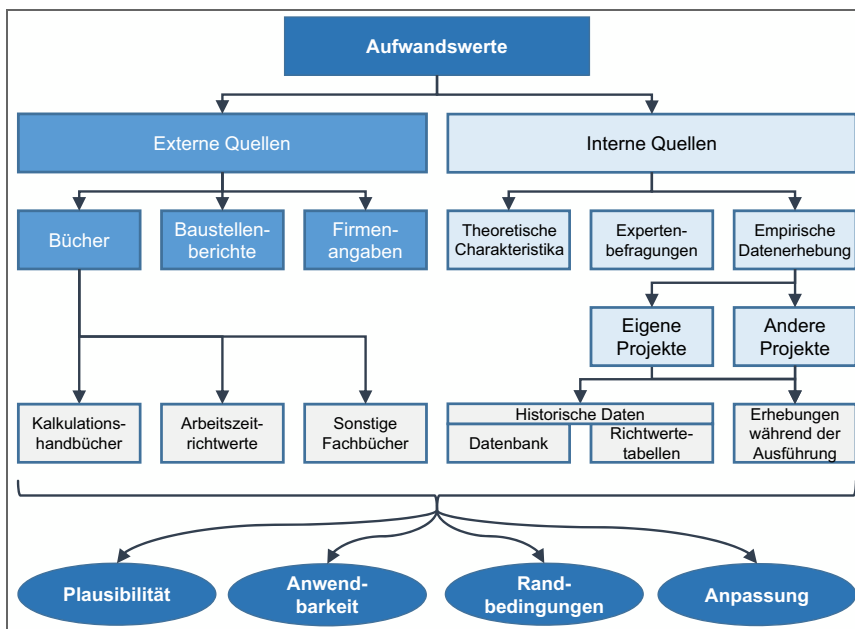


Abb. 7-4 Herkunft von Aufwandswerten<sup>11</sup>

Übertragen auf den Baubetrieb und die Bauwirtschaft gilt für den Umgang mit historischen Daten, dass diese völlig nutzlos sind, wenn sie nicht mit dem entsprechenden Kontext angereichert werden. Ohne Kenntnis darüber, wie und unter welchen Umständen die Werte zustande gekommen sind, sind diese unbrauchbar und irreführend. Die Art und Weise wie die Produktionsfaktoren kombiniert wurden und welche Begleitumstände aufgetreten sind, müssen entsprechend dokumentiert werden, damit die erhobenen Daten als anschauliche und nachvollziehbare Informationsquelle genutzt werden können. Für gestörte Bauprozesse ist es notwendig die „Symptome“ und auch die „Anamnese“ zu dokumentieren und zu beschreiben.<sup>12</sup>

Für verlässliche Kalkulationen und Berechnungen in der Projektvorbereitung, in der Angebotskalkulation, in der Arbeitsvorbereitung, während der Bauausführung und im Zuge des Claimmanagements ist eine systematische und strukturierte Dokumentation durchzuführen. Der Informationsgehalt kann durch Bilder, Pläne, Darstellungen von Abläufen etc. verstärkt werden.<sup>13</sup>

<sup>11</sup> Vgl. Hofstadler (2008). Schararbeiten. S. 309

<sup>12</sup> Vgl. Hofstadler (2015). Unveröffentlichtes Arbeitspapier.

<sup>13</sup> Vgl. Hofstadler (2015). Unveröffentlichtes Arbeitspapier.

Der Weg der Informationen vom Informationserzeuger zum Informationsbenutzer ist so zu gestalten, dass die erhobenen Daten richtig interpretiert und ohne den Informationserzeuger verstanden werden können. Der qualitative Ablauf der Dokumentation ist in Abb. 7-5 dargestellt.

Bezogen auf Aufwands- und Leistungswerte ist eine sinnvolle Dokumentation nur dann zu erreichen, wenn auch die Umstände, unter denen diese Werte zustande gekommen sind, mit aufgezeichnet werden. Für das Extrahieren von Bandbreiten oder Verteilungsfunktionen aus den dokumentierten Daten kann eine entsprechende Kategorisierung nach Baustellentypen, Schwierigkeitsgraden etc. erfolgen.

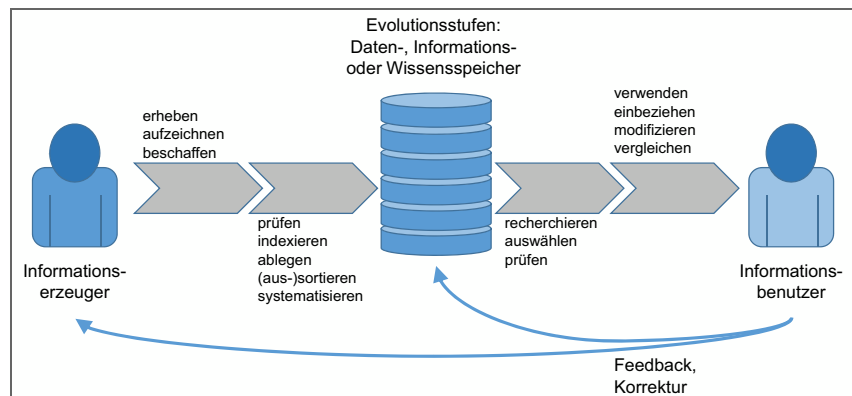


Abb. 7-5 Qualitativer Ablauf der Dokumentation

Der belastbaren Dokumentation in der Bauausführung sollte zukünftig – nicht nur im Hinblick auf das Claim- und Anti-Claim-Mangement, sondern auch für die Kalkulation und Arbeitsvorbereitung – eine größere Bedeutung zukommen. Hier ist ein entsprechender Forschungsbedarf gegeben, der sich sowohl auf die Datenerhebung auf der Baustelle, die Strukturierung und Organisation sowie die Filterung, Verwendung und Prüfung der erhobenen Daten bezieht. Weiters gilt es auch die Verknüpfung der erhobenen Daten mit BIM-Modellen zu untersuchen.

### 7.3 Qualitativer Wirkungszusammenhang

Der qualitative Zusammenhang zwischen der Bauzeit und den Baukosten wurde bereits von mehreren Autoren aufgezeigt – siehe Abschnitt 4.3. Auch durch die durchgeführte ExpertInnenbefragung konnte dieser Zusammenhang abgebildet werden (siehe Abschnitt 6.6.4).

Wird eine zu kurze oder eine zu lange Bauzeit vorgegeben, steigen in der Regel die Kosten, da die Ressourcen nicht normal eingesetzt werden können. Die Zusammensetzung und Kombination der Produktionsfaktoren muss dann entsprechend verändert werden, dass z.B. die zu kurze Bauzeit eingehalten werden kann. Dadurch können Produktivitätsverluste auftreten, die sich negativ auf die Aufwands- und Leistungswerte auswirken. Die veränderte Ressourcenzusammensetzung, gemeinsam mit Aufwands- und Leistungswertveränderungen – bedingt durch Produktivitätsverluste – wirken sich erhöhend auf die Kostenanteile aus. Die Baukosten und die Bauzeit

stehen damit über den „Umweg“ der Ressourcenveränderung und die damit entstehenden Produktivitätsverluste in Zusammenhang.

Nachfolgend erfolgt sowohl eine qualitative Grob- als auch eine Detailbetrachtung der Wirkungszusammenhänge bezogen auf die Baukosten und Bauzeiten in Verbindung mit dem Ressourceneinsatz und auftretenden Produktivitätsverlusten.

### 7.3.1 Grobbetrachtung

Bei komplexen Systemen, in denen sich die einzelnen Komponenten gegenseitig beeinflussen, kann es hilfreich sein zunächst Wirkungsgraphen zu erstellen, in denen die grundlegenden Zusammenhänge und Verknüpfungen zwischen den Systemgrößen mit Pfeilen (gerichtete Kanten) und Knoten dargestellt werden. In dieser Phase werden noch keine quantitativen Aussagen getroffen – dies erfolgt erst im mathematischen Modell. Zu beachten ist, dass sich einzelne Systemkomponenten auch rekursiv beeinflussen können (Rückkoppelungen). Werden solche Zusammenhänge in ein Gleichungssystem übergeführt, ist diese meist so kompliziert, dass Simulationen dabei helfen das Systemverhalten kennenzulernen.<sup>14</sup>

Die komplexe Wechselbeziehung zwischen Baukosten und Bauzeit – mit zahlreichen Rückkoppelungen – ist in Abb. 7-6 vereinfacht in Form eines Wirkungsgraphen dargestellt. Die Pfeile zeigen, welche Elemente des Graphen andere Elemente beeinflussen oder mit diesen in Zusammenhang stehen. Der Ressourceneinsatz wirkt sich dabei teilweise auf die vorgefundenen äußeren Umstände aus; die äußeren Umstände können aber auch den Ressourceneinsatz beeinflussen. Durch eine längere tägliche Arbeitszeit ergeben sich beispielsweise Auswirkungen auf die vorhandenen Lichtverhältnisse. Die vorhandenen Platzverhältnisse können umgekehrt bestimmend auf die Anzahl der einsetzbaren Geräte (z.B. Anzahl der Krane) wirken.

Die äußeren Umstände und der Ressourceneinsatz können bei Über- oder Unterschreitung spezifischer Grenzgrößen zu Produktivitätsverlusten führen. Diese wirken sich direkt auf die Aufwands- und Leistungswerte aus. Die Kostenanteile und damit die Baukosten lassen sich aus dem Ressourceneinsatz, zusammen mit den entsprechenden Aufwands- und Leistungswerten, ermitteln.

Parameter wie Konkurrenz, Zuschläge/Nachlässe, Marktlage etc. führen in weiterer Folge zum Preis. Der komplexe und oft auch subjektiv behaftete Vorgang der Preisbildung ist nicht Thema dieser Arbeit.

Die roten Pfeile<sup>15</sup> zeigen einerseits die Rückkoppelung einer nicht normalen Bauzeit auf die Ressourcen, andererseits die Auswirkungen von dadurch auftretenden Produktivitätsverlusten auf die Aufwands- und Leistungswerte.

Der Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit liegt also nicht nur direkt vor (z.B. durch die zeitgebundenen Kosten der Baustelle), sondern ergibt sich auch über einen veränderten Ressourceneinsatz, der diese Wechselwirkung verstärkt. Ist diese bei den Beteiligten bekannt, ist auch eine weitere Rückkoppelung zwischen den Baukosten und der Bauzeit bzw. dem Ressourceneinsatz denkbar. Bei zu hohen Baukosten könnte dies Auswir-

<sup>14</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 271

<sup>15</sup> größere Strichstärke der Kanten bzw. Pfeile

kungen auf die neuerliche Festlegung der Bauzeit oder den geplanten Ressourceneinsatz haben (siehe strichlierte rote Pfeile in Abb. 7-6).

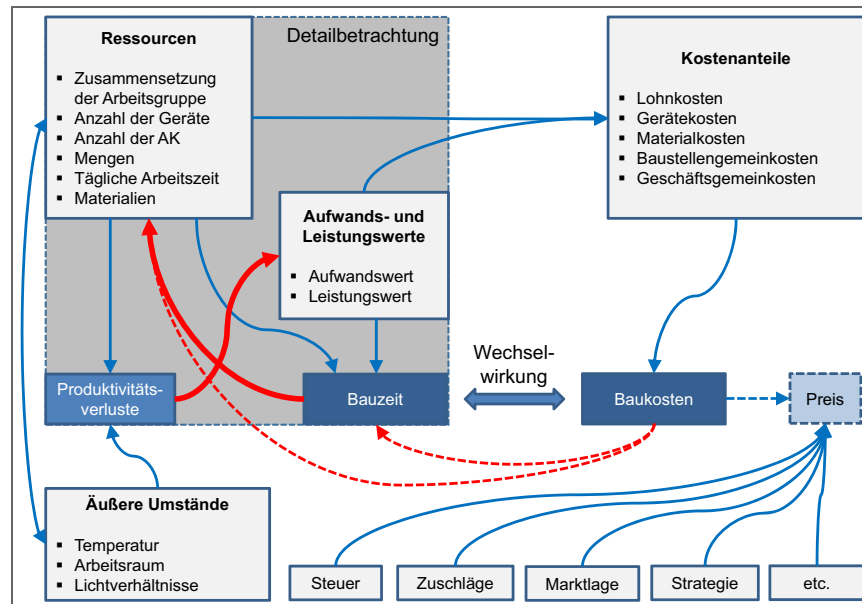


Abb. 7-6 Wirkungsgraph – Zusammenhang zwischen Bauzeit und Baukosten

Die qualitative Darstellung des Wirkungsgraphen gilt es im Zuge der Modellbildung in ein Gleichungssystem überzuführen, mit dem Analysen und Berechnungen durchgeführt werden können.

Zunächst erfolgt aber eine detaillierte Betrachtung der qualitativen Zusammenhänge zwischen Ressourceneinsatz und Produktivitätsverlusten.

### 7.3.2 Detailbetrachtung

Im Zuge der Bauausführung treten oft mehrere Umstände, die negative Auswirkungen auf die Produktivität und damit auf die Aufwandswerte haben können, gleichzeitig auf. Meist beeinflussen sich diese Produktivitätsverluste bzw. die daraus erforderlichen Forcierungsmaßnahmen gegenseitig. Wird z.B. aufgrund der Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche ein Produktivitätsverlust schlagend, kann durch den Einsatz von noch mehr Arbeitskräften versucht werden, dem entgegenzuwirken. Dies kann jedoch noch größere Produktivitätsverluste hervorrufen, da die Arbeitsfläche je Arbeitskraft noch kleiner wird, die Krankkapazität nicht mehr ausreichend ist etc. Eine weitere Möglichkeit der Forcierung wäre in diesem Fall die Erhöhung der täglichen Arbeitszeit. Wird aber eine gewisse Grenzgröße überschritten, ist auch dadurch mit einem zusätzlichen Produktivitätsverlust bzw. mit einer Reduktion der tatsächlich nutzbaren täglichen Arbeitszeit zu rechnen.

In der Detailbetrachtung werden lediglich die Zusammenhänge zwischen der vorgegebenen Bauzeit, der damit erforderlichen Leistung, dem Ressourceneinsatz und den durch Grenzgrößenüber- oder -unterschreitungen bedingten Produktivitätsverlusten (PV), die in weiterer Folge direkt eine Aufwandswerterhöhung bedingen, betrachtet (siehe Abb. 7-7).



Die vom AG vorgegebene Bauzeit kann entweder normal, zu kurz oder zu lang sein. Je nach Bauzeit und zu erbringender Menge, lässt sich die erforderliche mittlere Tagesleistung ermitteln. Auf Basis dieser Leistung wird der Ressourceneinsatz (Anzahl der Arbeitskräfte  $AK_{ANZ}$ , tägliche Arbeitszeit  $AZ$ , Geräteinsatz usw.) gewählt. Bei Über- oder Unterschreitung spezifischer Grenzgrößen kann es zu Produktivitätsverlusten (PV) kommen, deren Auswirkungen aufaddiert zu einer Aufwandswerterhöhung führen. Der Prozess ist hier aber nicht abgeschlossen, wenn die Rückkoppelung des erhöhten Aufwandswerts berücksichtigt wird. Voraussetzung ist, dass die vorgegebene Bauzeit bzw. die erforderliche Leistung als fixe Größe vorgegeben ist (die Bauzeit also eingehalten werden muss). Diese Rückkoppelung hat wiederum Einfluss auf den Ressourceneinsatz – z.B. durch Änderung der Anzahl an Arbeitskräften – wodurch Produktivitätsverluste verringert, verstärkt oder auch neue hervorgerufen werden können.

Die Berücksichtigung dieser Rückkoppelungen bzw. gegenseitigen Beeinflussung und Aufschaukelung wird als Aggregation bezeichnet (Definition siehe Abschnitt 4.10.2).

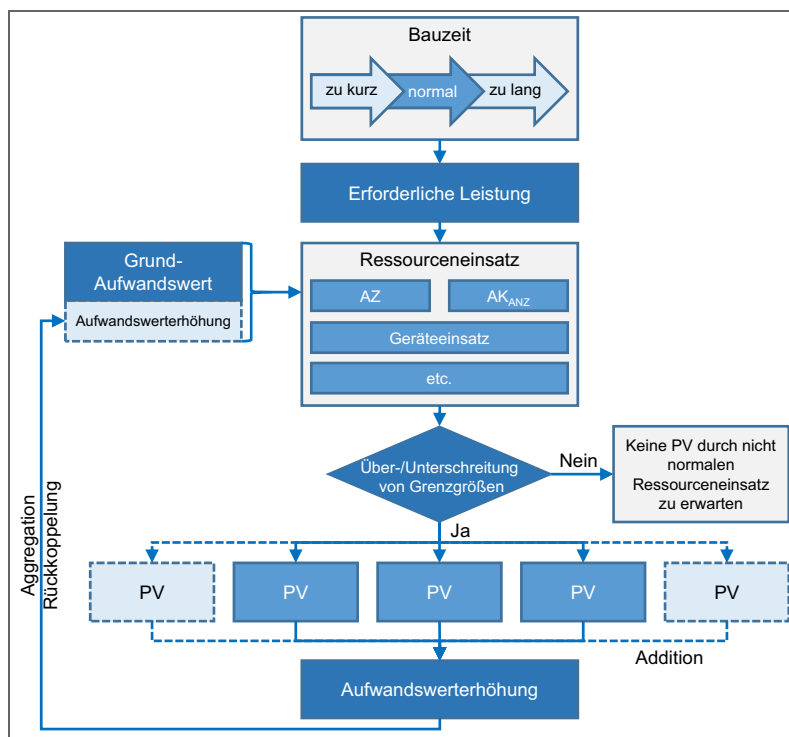


Abb. 7-7 Qualitativer Wirkungszusammenhang – Detailbetrachtung

Der gezeigte qualitative Zusammenhang gilt sowohl für deterministische als auch für probabilistische Berechnungen. Optimierungen können im Bereich des Ressourceneinsatzes erfolgen und bilden bei mehreren anpassbaren Parametern ein mehrdimensionales Optimierungsproblem. Die Lösung solcher Optimierungsprobleme ist analytisch meist nicht möglich, weshalb numerische Näherungsverfahren eingesetzt werden (siehe Abschnitt 7.7).

## 7.4 Betrachtungszustände

Für die Betrachtung des gemeinsamen Eintretens mehrerer Produktivitätsverluste kann grundsätzlich in eine Top-Down- und eine Bottom-Up-Betrachtung unterschieden werden (siehe Abb. 7-8).

Für den Top-Down-Ansatz ist die Gesamtheit der Produktivitätsverluste bekannt (z.B. als Summe der Lohnstunden eines bereinigten IST-Zustandes gegenüber einem geplanten SOLL) und es soll ermittelt werden, welchen Anteil die einzelnen Produktivitätsverluste am Gesamtproduktivitätsverlust haben. Diese Sichtweise ist besonders in der Nachbetrachtung von Bauprojekten von Interesse, wenn es darum geht, die unterschiedlichen Produktivitätsverluste und deren Ursachen den jeweiligen Vertragsparteien bzw. deren Sphären zuzuordnen und monetär zu bewerten. Eine eindeutige Zuordnung und Rückrechnung gestaltet sich in solchen Fällen meist schwierig, da Störeinflüsse aus der neutralen Sphäre ebenfalls im Gesamt-Produktivitätsverlust enthalten sein können und eine entsprechende Dokumentation für die Nachweisführung erforderlich ist.

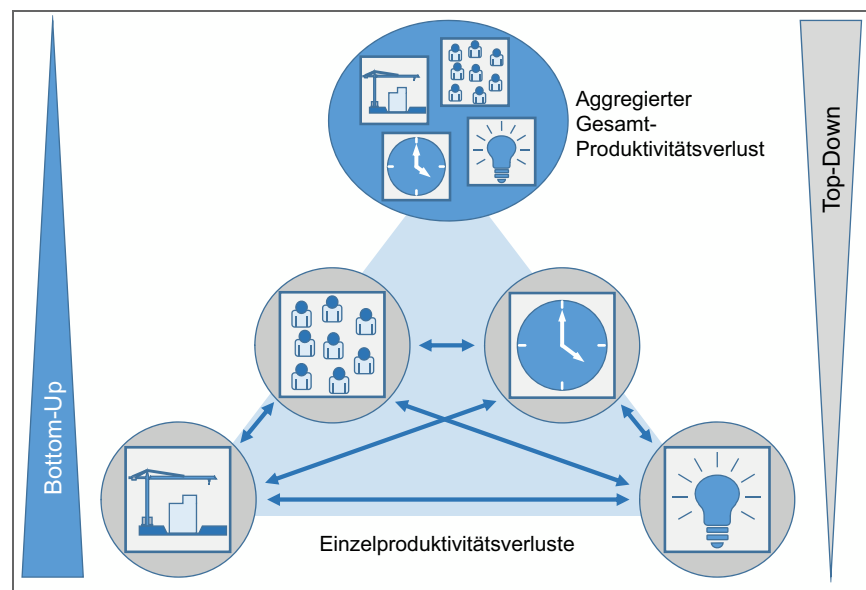


Abb. 7-8 Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz bei der Betrachtung von Produktivitätsverlusten

Beim Bottom-Up-Ansatz wird der umgekehrte Weg verfolgt. Die Auswirkungen der Einzelproduktivitätsverluste und deren gegenseitige Beziehungen und Beeinflussungen werden zu einer aggregierten Gesamtheit zusammengefasst. Durch den Bottom-Up-Ansatz (bei dem im Zuge der Aggregation iterative Berechnungen erforderlich werden) kann für jeden der Einzelproduktivitätsverluste der Anteil am Gesamt-Produktivitätsverlust berechnet werden. Außerdem lassen sich auch die gegenseitigen Beeinflussungen der Einzelproduktivitätsverluste aufeinander durch gesonderte Berechnungen ermitteln. Eine vertiefte Betrachtung des quantitativen Wirkungszusammenhangs erfolgt im folgenden Abschnitt.

## 7.5 Quantitativer Wirkungszusammenhang

Qualitativ wurden die Zusammenhänge zwischen Baukosten, Bauzeit, Aufwands- und Leistungswerten, Produktivitätsverlusten, Ressourceneinsatz, äußeren Umständen, Kostenanteilen und Einflussfaktoren auf den Preis bereits in Form eines Wirkungsgraphen für die Grobbetrachtung (siehe Abb. 7-6) sowie als Ablaufdiagramm für die Detailbetrachtung (siehe Abb. 7-7) gezeigt.

Es gilt nun ein Modell aufzustellen, welches die Zusammenhänge zwischen den Quellen möglicher Produktivitätsverluste vereint. Erst mit einem solchen mathematischen Modell – das Rückkoppelungen und Nichtlinearitäten berücksichtigt – kann in weiterer Folge eine Optimierung des Ressourceneinsatzes (und damit der Baukosten und Bauzeit) angedacht werden. Da es immer mehrere Möglichkeiten gibt, einen Produktivitätsverlust zu kompensieren (z.B. Erhöhung der Anzahl an AK, Erhöhung der täglichen Arbeitszeit, Erhöhung der Krankapazität, Erhöhung der Baudauer), handelt es sich in einem solchen Fall um ein mehrdimensionales Optimierungsproblem, welches mit probabilistischen Berechnungsverfahren näherungsweise gelöst werden kann (siehe Abschnitt 7.7).<sup>16</sup>

### 7.5.1 Ermittlung der erforderlichen Leistung

Die vom AG vorgegebene Bauzeit wurde als zentrale Rahmenbedingung identifiziert, die direkten Einfluss auf den Ressourceneinsatz der AN und damit auch auf die erzielbare Produktivität hat. Wird die Bauzeit zu kurz oder zu lang vorgegeben, kommt es bei Über- oder Unterschreitung spezifischer Grenzgrößen zu Produktivitätsverlusten, die sich erhöhend auf die Kosten auswirken.

Im Zuge einer Grobbetrachtung kann der Zusammenhang zwischen der Dauer der Stahlbetonarbeiten  $D_{STB}$  [d], der herzustellenden Stahlbetonmenge  $BT_M$  [m<sup>3</sup>] und der erforderlichen mittleren täglichen Leistung  $L_{STB,ERF}$  [m<sup>3</sup>/d] mit folgender Gleichung dargestellt werden:

$$L_{STB,ERF} = \frac{BT_M}{D_{STB}} \quad (7-1)$$

Die mittlere Leistung wiederum errechnet sich aus dem Produkt der täglichen Arbeitszeit  $AZ$  [h/d] und der mittleren Anzahl an Arbeitskräften  $AK$  [Std/h], dividiert durch den Gesamt-Aufwandswert der Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB}$  [Std/m<sup>3</sup>] (siehe Glg. (7-2)).

$$L_{STB,ERF} = \frac{AZ \cdot AK}{AW_{STB}} \quad (7-2)$$

Kommt es zu einer Abweichung von der normalen Bauzeit (Verkürzung oder Verlängerung), ändert sich auch die erforderliche mittlere tägliche Leistung. Es ergibt sich für die erforderliche Leistung im Zusammenhang mit der Bauzeitveränderung ein regressiver Verlauf (siehe Abb. 7-9).

<sup>16</sup> Noch komplexer wird die Modellbildung, aber auch eine mögliche Optimierung, wenn die gesamte Bauzeit in kleinere Zeitintervalle (Monate, Wochen, Tage) unterteilt wird und in jedem dieser Zeitintervalle ein unterschiedlicher Ressourceneinsatz möglich sein soll.

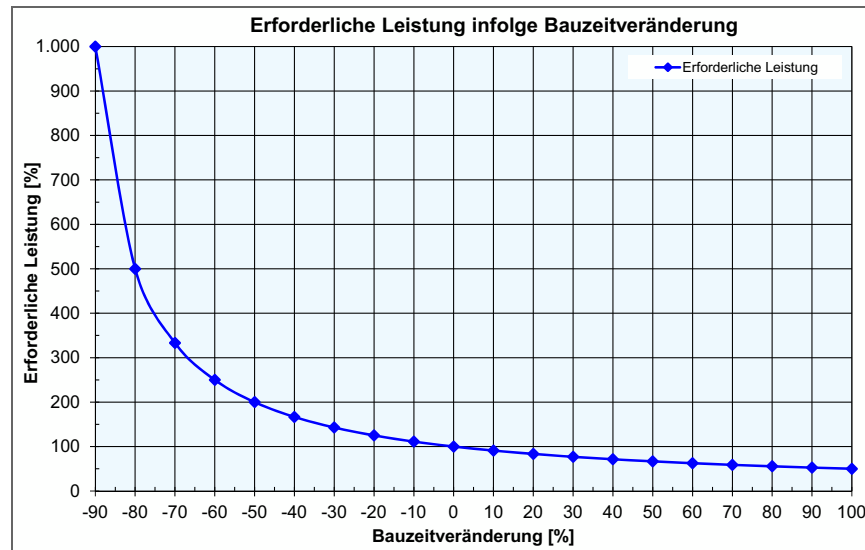


Abb. 7-9 Erforderliche Leistung infolge Bauzeitveränderung

Der Zusammenhang zwischen der Bauzeitveränderung  $\Delta BZ$  [%] und der erforderlichen Leistung  $L_{STB,ERF}$  [%] kann auch in Form nachstehender Gleichung angeschrieben werden:

$$L_{STB,ERF} = \frac{100 \%}{(100 \% + \Delta BZ)} \cdot 100 \% \quad (7-3)$$

Nachdem sich die erforderliche Leistung der Stahlbetonarbeiten nach Glg. (7-2) errechnet, kann entweder die tägliche Arbeitszeit  $AZ$  [h/d], die Anzahl der Arbeitskräfte  $AK$  [Std/h] oder der Gesamt-Aufwandswert  $AW_{STB}$  [Std/m<sup>3</sup>] entsprechend angepasst werden. Eine Verringerung des Aufwandswerts ist in der Regel nur durch eine Technologieverbesserung, Optimierungen von Abläufen o.Ä. erzielbar. Als kurzfristiges Steuerungselement eignet sich die Anpassung der Aufwandswerte daher nicht.<sup>17</sup>

Es bleiben daher für kurzfristige Steuerungsmaßnahmen im Wesentlichen nur die Möglichkeiten einer Arbeitszeitanpassung bzw. einer Änderung der Anzahl an Arbeitskräften als praktikable Lösungen übrig. Von diesen Maßnahmen können natürlich auch weitere Ressourcen betroffen sein (z.B. erforderliche Anzahl der Krane, verfügbarer Arbeitsraum, Lichtverhältnisse).

Eine Erhöhung der täglichen Arbeitszeit ist aufgrund arbeitsrechtlicher Bestimmungen nur bis zu einem gewissen Punkt möglich und sinnvoll, da mit erhöhter täglicher Arbeitszeit die Produktivität der Arbeitskräfte sinkt (siehe Abschnitt 4.9.3). Eine Ausweitung der täglichen Arbeitszeit ist ab einer bestimmten Grenze nur durch Mehrschichtbetrieb möglich. Auch die Anzahl der Arbeitskräfte kann nicht unendlich angehoben werden, da sich diese bei der Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche gegenseitig behindern würden (siehe Abschnitt 4.9.6). Auch kann die Anzahl der zur Verfügung stehenden Geräte und Materialien die Anzahl der Arbeitskräfte limitieren (siehe Abschnitt 4.9.1). In der Praxis gilt es ein Optimum aus der Änderung der

<sup>17</sup> Der rechnerische Zusammenhang zwischen der Bauzeit für die Stahlbetonarbeiten und dem Aufwandswert ist linear. Wird beispielsweise die Bauzeit um 20 % verkürzt, müsste auch der Gesamt-Aufwandswert für die Stahlbetonarbeiten um 20 % verringert werden, um bei gleicher Anzahl an Arbeitskräften und unter Beibehaltung der täglichen Arbeitszeit die gleiche Leistung zu erbringen.

täglichen Arbeitszeit, der Anzahl an Arbeitskräften und der Verringerung des Aufwands werts zu finden, mit dem die geforderte Leistung in der vorgegebenen Bauzeit erbracht werden kann.

### 7.5.2 Erhöhung des Grund-Aufwands werts infolge von Produktivitätsverlusten

Treten Produktivitätsverluste auf, wird der Grund-Gesamt-Aufwands wert  $AW_{STB,GRUND}$  [Std/m<sup>3</sup>] (bei normalem Einsatz der Produktionsfaktoren) erhöht. Diese Erhöhung kann entweder durch die reine Addition  $AW_{ERH,ADD}$  [Std/m<sup>3</sup>] oder durch eine Aggregation von Produktivitätsverlusten  $AW_{ERH,AGG}$  [Std/m<sup>3</sup>] ermittelt werden.

Je nachdem, welche Betrachtung durchgeführt wird, ergibt sich der erhöhte Gesamt-Aufwands wert der Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB,ERH,GES}$  [Std/m<sup>3</sup>] nach Glg. (7-4) bzw. nach Glg. (7-5).

$$AW_{STB,ERH,GES} = AW_{STB,GRUND} + AW_{ERH,ADD} \quad (7-4)$$

$$AW_{STB,ERH,GES} = AW_{STB,GRUND} + AW_{ERH,AGG} \quad (7-5)$$

Die Berechnung der Aufwands werverhöhungen für die Addition und Aggregation unterscheiden sich voneinander. Für die Aggregation werden gegenseitige Beeinflussungen und Aufschaukelungseffekte mitberücksichtigt, um die erforderliche Leistung auch trotz der Aufwands werverhöhungen erreichen zu können. Dazu sind iterative Berechnungen erforderlich, wobei die reine Addition den ersten Iterationsschritt darstellt.

### 7.5.3 Zusammensetzung der Aufwands werverhöhungen

Für die Addition der Einzelproduktivitätsverluste werden die Aufwands werverhöhungen  $AW_{ERH,i}$  [Std/m<sup>3</sup>] lediglich aufsummiert (siehe Glg. (7-6)). Rückkoppelungen und gegenseitige Beeinflussungen werden dabei nicht berücksichtigt. Es wird dabei auch keine iterative Berechnung durchgeführt. D.h. die Aufwands werverhöhung (egal wie hoch diese auch ist) hat keine Auswirkung auf den ursprünglich angenommenen Ressourceneinsatz.

$$AW_{ERH,ADD} = \sum_{i=1}^n AW_{ERH,i} \quad (7-6)$$

Die aggregierte Aufwands werverhöhung  $AW_{ERH,AGG}$  [Std/m<sup>3</sup>], die sich aus den einzelnen Aufwands werverhöhungen  $AW_{ERH,i,j}$  [Std/m<sup>3</sup>] zusammensetzt, kann als Doppelsumme angeschrieben werden:

$$AW_{ERH,AGG} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n AW_{ERH,i,j} \quad (7-7)$$

Dieser Zusammenhang kann ebenfalls in Matrixschreibweise dargestellt werden. In Glg. (7-8) wird die Aufwands werverhöhung für drei Produktivitätsverluste bzw. Aufwands werverhöhungen angeführt. Es handelt sich dabei um eine 3 x 3 Matrix ( $n = m$ ), wobei entlang der Hauptdiagonalen die aggregierten Einzelproduktivitätsverluste aufgetragen sind.

$$AW_{ERH,AGG} = 1_n^T \cdot \begin{bmatrix} AW_{ERH,1,1} & AW_{ERH,1,2} & AW_{ERH,1,3} \\ AW_{ERH,2,1} & AW_{ERH,2,2} & AW_{ERH,2,3} \\ AW_{ERH,3,1} & AW_{ERH,3,2} & AW_{ERH,3,3} \end{bmatrix} \cdot 1_n \quad (7-8)$$

Weiters sind in der ersten Zeile die Aufwandswerterhöhungen der Produktivitätsverluste 2 und 3 (Wirkung) infolge des Auftretens von Produktivitätsverlust 1 (Ursache) aufgetragen ( $AW_{ERH,1,2}$  und  $AW_{ERH,1,3}$ ). In der zweiten Zeile sind jene Aufwandswerterhöhungen angeführt, die aufgrund des Eintritts des Produktivitätsverlusts 2 zu erwarten sind ( $AW_{ERH,2,1}$  und  $AW_{ERH,2,3}$ ) usw.

Für die Berechnung der einzelnen Terme der Matrix sind iterative Berechnungen erforderlich, bei denen die Auswirkungen der jeweiligen Produktivitätsverluste gesondert ermittelt werden. Für die Ermittlung des Terms  $AW_{ERH,3,2}$  ist es beispielsweise erforderlich, dass nur der Eintritt des Produktivitätsverlusts 3 und dessen Auswirkungen auf den Produktivitätsverlust 2 während der Berechnung zulässig sind.

#### 7.5.4 Abhängigkeiten der Aufwandswerterhöhungen vom Ressourceneinsatz und den Randbedingungen

Die einzelnen Aufwandswerterhöhungen  $AW_{ERH,i}$  für die Addition bzw.  $AW_{ERH,i,j}$  für die Aggregation werden als Funktion verschiedener Parameter, die entweder den Ressourceneinsatz und/oder die äußeren Umstände betreffen (siehe Glg. (7-9) und Glg. (7-10)), ermittelt.

$$AW_{ERH,i} = f(AZ, ANZ_{AK}, ANZ_K, LV, TMP, AF_{VOR} \text{ etc.}) \quad (7-9)$$

$$AW_{ERH,i,j} = f(AZ, ANZ_{AK}, ANZ_K, LV, TMP, AF_{VOR} \text{ etc.}) \quad (7-10)$$

Dabei muss nicht jede Aufwandswerterhöhung durch alle der in den Gleichungen beispielhaft angeführten Parameter bedingt werden. Ein Produktivitätsverlust infolge nicht optimaler Tagestemperatur ist beispielsweise nur von der Temperatur, nicht jedoch von den Lichtverhältnissen, der vorhandenen Arbeitsfläche etc. abhängig.<sup>18</sup>

#### 7.5.5 Abhängigkeiten des Ressourceneinsatzes

Wird die Bauzeit als fix vorgegebene Größe angesehen, ist die erforderliche Leistung  $L_{STB,ERF}$  im Zuge der Aggregation ebenfalls ein vorgegebener Wert, der auch beim Eintritt von Produktivitätsverlusten eingehalten werden muss. Dies bedeutet aber im Umkehrschluss, dass der Ressourceneinsatz immer auch vom erhöhten Gesamt-Aufwandswert abhängig ist. Als Beispiel wird die Anzahl der Arbeitskräfte betrachtet. Es handelt sich dabei um eine Funktion der erforderlichen Leistung und in weiterer Folge um eine Funktion des erhöhten Gesamt-Aufwandswerts und der täglichen Arbeitszeit (siehe Glg. (7-11)).

$$ANZ_{AK} = f(L_{STB,ERF}) = f(AW_{STB,ERH,GES}, AZ) \quad (7-11)$$

<sup>18</sup> Im gezeigten Modell wird die Anzahl der Arbeitskräfte mit jedem stufenweisen Iterationsschritt angepasst, damit die erforderliche Leistung, zur Erreichung einer zu kurzen Bauzeit eingehalten werden kann.

Ebenso ist die tägliche Arbeitszeit eine Funktion der erforderlichen Leistung und damit eine Funktion der Anzahl an Arbeitskräften und des erhöhten Gesamt-Aufwandswerts (siehe Glg. (7-12)).

$$AZ = f(L_{STB,ERF}) = f(AW_{STB,ERH,GES}, ANZ_{AK}) \quad (7-12)$$

Weiters kann sich der Ressourceneinsatz in weiterer Folge auf andere Parameter (z.B. Anzahl der Geräte, Lichtverhältnisse, genutzter Arbeitsraum, Arbeitsgruppengröße) auswirken.

Hier zeigt sich nun das Erfordernis von iterativen Berechnungen bei der Aggregation von Produktivitätsverlusten, da sich einerseits der erhöhte Gesamt-Aufwandswert auf den Ressourceneinsatz, andererseits der Ressourceneinsatz (neben äußeren Einflüssen wie mittlere Tagestemperatur, verfügbare Arbeitsfläche etc.) auf das Auftreten von Produktivitätsverlusten und damit auf die Aufwandswerterhöhungen auswirkt.

Die praktische Umsetzung dieser iterativen Berechnungen erfolgt in MS Excel durch die Verknüpfung der Berechnungszellen als Zirkelbezug.<sup>19</sup>

Auf eine detaillierte Darstellung der Gleichungen, in denen auch die nichtlinearen Kurvenverläufe der einzelnen Produktivitätsverluste enthalten sind, wird hier bewusst verzichtet. Um die Zusammenhänge dennoch in Form einer praktischen Anwendung darzustellen, werden die einzelnen Verknüpfungen anhand eines Beispiels in Kap. 8 gezeigt und beschrieben.

## 7.6 Anforderungsprofil, Zielbeschreibung und Abgrenzung

Für ein Berechnungsmodell, das Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten berücksichtigt, ist vor der eigentlichen Modellbildung eine Zielbeschreibung bzw. ein Anforderungsprofil zu erstellen. Für die vorliegende Problemstellung wird sowohl ein Lastenheft mit den geforderten Spezifikationen als auch ein darauf aufbauendes Pflichtenheft, in dem Lösungs- und Umsetzungsvorschläge enthalten sind, erstellt.

### 7.6.1 Lastenheft

Ein Lastenheft<sup>20</sup> ist das Ergebnis einer Anforderungsanalyse bzw. Zielbeschreibung und hält besondere Spezifikationen und Erfordernisse an eine bestimmte Leistung fest. Es werden konkrete Anforderungen an ein Berechnungsmodell zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten punktuell, in Kategorien unterteilt, festgehalten. Dabei wird eine Beschreibung je Anforderung sowie ein Prüfkriterium zur Zielerreichung angeführt. Weiters wird in Muss-, Soll- und Kann-Ziele unterschieden, um eine Priorisierung vorzunehmen.

#### Muss- und Soll-Ziele

Muss-Ziele müssen unbedingt erreicht werden. Eine potenzielle Lösung, die auch nur ein Muss-Ziel nicht erfüllt, scheidet aus. Muss-Ziele müssen immer

<sup>19</sup> In den Optionen kann eingestellt werden, dass Zirkelbezüge durch die Aktivierung iterativer Berechnungen zugelassen werden.

<sup>20</sup> Nach DIN 69901-5:2009, S. 9, ist ein Lastenheft eine „vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines (Projekt-)Auftrags“.

so formuliert werden, dass objektiv und eindeutig festgestellt werden kann, ob sie erreicht wurden. Sie haben die höchste Priorität und werden von allen Projektbeteiligten mit größter Anstrengung verfolgt.

Soll-Ziele sind Ziele, deren Erreichen positiv beurteilt wird. Sie müssen aber nicht um jeden Preis vollständig erreicht werden, sollten aber weitestgehend realisiert werden. Der Projekterfolg ist auch ohne die vollständige Erreichung dieser Ziele gewährleistet.

### Kann- und Nicht-Ziele

Kann-Ziele werden teilweise auch als Wunsch-Ziele bezeichnet. Das Erreichen stellt einen zusätzlichen Bonus dar. Oft wird daran nur gearbeitet, wenn die Erreichung nicht aufwändig ist und wenig Kosten verursacht. Bei Kann-Zielen handelt es sich um „nice-to-haves“, für den erfolgreichen Abschluss eines Projekts sind sie jedoch nicht erforderlich.

Ein Nicht-Ziel begrenzt das Projekt, um es überschaubar zu machen. Ohne Formulierung von Nicht-Zielen kann es passieren, dass während der Projektumsetzung zusätzliche potentielle Schwerpunkte attraktiv werden und das Projekt ausufert. Sie beschreiben außerdem Folgen und Auswirkungen, die im Zuge der Bearbeitung unbedingt vermieden werden sollten.

In Tab. 7-1 und Tab. 7-2 wird das Lastenheft für das Modell zur Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten und Nichtlinearitäten aufgelistet. In Spalte A wird in Gruppen bzw. Kategorien unterschieden. Spalte B enthält die Kurzbezeichnung und Spalte C die Beschreibung der einzelnen Ziele und Anforderungen. Das Prüfkriterium ist in Spalte D und die Art des Ziels in Spalte E eingetragen.

Lastenheft					
Lfd. Nr.	Gruppe/ Kategorie	Ziel/ Anforderung	Anforderungsbeschreibung	Prüfkriterium	Art des Ziels
0	A	B	C	D	E
1	Leistungen	Stahlbetonarbeiten	Einschränkung des Modells auf Stahlbetonarbeiten im Hochbau.	Berücksichtigung von Stahlbetonarbeiten? Ja/Nein	Muss
2		Grobbetrachtung	Betrachtung von Stahlbetonarbeiten insgesamt durch Einbeziehung aller Ortbetonbauteile.	Grobbetrachtung möglich? Ja/Nein	Muss
3		Detailbetrachtung	Betrachtung von Stahlbetonarbeiten getrennt nach Schalen, Bewehren und Betonieren für unterschiedliche Bauteilgruppen.	Detailbetrachtung möglich? Ja/Nein	Kann
4	Bauzeit	Normale Bauzeit	Berechnung der normalen Bauzeit.	Berechnung der normalen Bauzeit möglich? Ja/Nein	Muss
5		Bauzeitverkürzung	Berechnung der Bauzeitverkürzung in Abhängigkeit einer vom AG vorgegebenen Bauzeit.	Berücksichtigung der Bauzeitverkürzung möglich? Ja/Nein	Muss
6		Bauzeitverlängerung	Berechnung der Bauzeitverlängerung in Abhängigkeit einer vom AG vorgegebenen Bauzeit.	Berücksichtigung der Bauzeitverlängerung möglich? Ja/Nein	Kann
7		Bauzeitbegrenzung	Unterscheidung zwischen begrenzter Bauzeit und unbegrenzter Bauzeit.	Unterscheidung möglich? Ja/Nein	Kann

**Tab. 7-1** Lastenheft für ein Berechnungsmodell zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten – Teil 1



Lastenheft					
Lfd. Nr.	Gruppe/ Kategorie	Ziel/ Anforderung	Anforderungsbeschreibung	Prüfkriterium	Art des Ziels
0	A	B	C	D	E
8	Berücksichtigung von Nichtlinearitäten	Kurvenverläufe	Eingabe individueller Kurvenverläufe einzelner Produktivitätsverluste muss möglich sein. Als Standard-Kurvenverläufe werden Ergebnisse einer ExpertInnenbefragung an der TU Graz angesetzt.	Individuelle Eingabe möglich? Ja/Nein	Muss
9			Kurvenverläufe der mittleren Tagestemperatur sollen für verschiedene Orte ausgewählt und der Berechnung zugrunde gelegt werden können.	Anwendung von spezifischen Temperaturkurven je nach ausgewähltem Ort.	Soll
10			Eingabe eines individuellen Kurvenverlaufs für die Mittelohnkosten in Abhängigkeit der vorgegebenen Bauzeit.	Individuelle Eingabe möglich? Ja/Nein	Kann
11	Produktivitätsverluste	Krankkapazität	Eine zu geringe Krankkapazität wirkt sich erhöhend auf den Aufwandswert aus.	Berücksichtigung möglich? Ja/Nein	Muss
12		Arbeitsraum	Eine zu geringe Arbeitsfläche je Arbeitskraft wirkt sich erhöhend auf den Aufwandswert aus.	Berücksichtigung möglich? Ja/Nein	Muss
13		Tägliche Arbeitszeit	Eine erhöhte tägliche Arbeitszeit wirkt sich auf die nutzbare Arbeitszeit aus.	Berücksichtigung möglich? Ja/Nein	Muss
14		Nicht optimale Arbeitsgruppen- bzw. Kolonnengröße	Eine zu große Arbeitsgruppen- bzw. Kolonnengröße wirkt sich erhöhend auf den Aufwandswert aus.	Berücksichtigung möglich? Ja/Nein	Muss
15			Eine zu kleine Arbeitsgruppen- bzw. Kolonnengröße wirkt sich erhöhend auf den Aufwandswert aus.	Berücksichtigung möglich? Ja/Nein	Muss
16		Lichtverhältnisse	Nicht ideale Lichtverhältnisse wirken sich erhöhend auf den Aufwandswert aus.	Berücksichtigung möglich? Ja/Nein	Muss
17		Temperatur	Nicht optimale Außentemperaturen wirken sich erhöhend auf den Aufwandswert aus.	Berücksichtigung möglich? Ja/Nein	Muss
18		Einsatzortwechsel	Ungeplante Einsatzortwechsel wirken sich erhöhend auf den Aufwandswert aus.	Berücksichtigung möglich? Ja/Nein	Kann
19	Planvorlauf/ Planqualität	Zu kurze Planvorlaufzeiten und mangelnde Planungsqualität wirken sich erhöhend auf den Aufwandswert aus.	Berücksichtigung möglich? Ja/Nein	Kann	
20	Kombination von Produktivitätsverlusten	Addition	Effekte einzelner Produktivitätsverluste werden additiv zusammengefasst. Rückkoppelungseffekte und Abhängigkeiten werden nicht berücksichtigt.	Addition von Produktivitätsverlusten möglich? Ja/Nein	Muss
21		Aggregation	Effekte einzelner Produktivitätsverluste werden aggregiert zusammengefasst. Rückkoppelungseffekte und Abhängigkeiten werden berücksichtigt.	Aggregation von Produktivitätsverlusten möglich? Ja/Nein	Muss
22	Gleichzeitigkeit mehrerer Produktivitätsverluste	Auswahl der Produktivitätsverluste	Die Auswahl, welche Produktivitätsverluste gleichzeitig eintreten können, muss im Berechnungsmodell möglich sein.	Auswahl einzelner Produktivitätsverluste möglich? Ja/Nein	Muss
23	Benutzerfreundlichkeit	Erweiterbarkeit	Das Modell sollte individuell erweitert werden können.	Erweiterbarkeit möglich? Ja/Nein	Soll
24		Farbliche Kennzeichnungen	Farbliche Kennzeichnung von Eingabe und Ausgabefeldern, um die Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen.	Farbliche Unterscheidung vorhanden und durchgängig? Ja/Nein	Muss
25	Berechnungsverfahren	Deterministische Berechnungen	Durchführung deterministischer Berechnungen für Baukosten und Bauzeiten.	Berechnungen deterministisch möglich? Ja/Nein	Muss
26		Probabilistische Berechnungen	Durchführung probabilistischer Berechnungen für Baukosten und Bauzeiten.	Berechnungen probabilistisch möglich? Ja/Nein	Muss
27	Unsicherheiten	Inputparameter	Berücksichtigung von Unsicherheiten für Inputparameter durch Verteilungsfunktionen bei probabilistischen Berechnungen.	Eingabe von Verteilungen möglich? Ja/Nein	Muss
28			Einbeziehung historischer Daten um Verteilungsfunktionen direkt zu generieren.	Verteilungen aus historischen Daten ableitbar? Ja/Nein	Kann
29	Korrelationen	Korrelationen	Berücksichtigung von Korrelationen im Zuge von probabilistischen Berechnungen.	Definition von Korrelationsmatrizen möglich? Ja/Nein	Kann
30	Optimierungen	Forcierungen	Durchführung von deterministischen und probabilistischen Optimierungen hinsichtlich der Baukosten bei vorgegebener Bauzeit. Vorschlag der günstigsten Forcierungsmaßnahmen bei berücksichtigten Produktivitätsverlusten.	Optimierungen möglich? Ja/Nein	Kann
31		Pönalen	Strafzahlungen bei Überschreitung der vorgegebenen Bauzeit werden in der Kostenermittlung berücksichtigt.	Einbeziehung möglich und Höhe der Pönalen individuell variierbar (Deckelung)? Ja/Nein	Kann

Tab. 7-2 Lastenheft für ein Berechnungsmodell zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten – Teil 2

### 7.6.2 Pflichtenheft

Aufbauend auf das Lastenheft wird ein Pflichtenheft<sup>21</sup> (siehe Tab. 7-3 und Tab. 7-4) erstellt, in dem konkrete Umsetzungsvorschläge und Lösungswege für die im Lastenheft definierten Anforderungsspezifikationen festgehalten werden.

Weiters wird in Spalte E angegeben, ob die definierten Ziele im Zuge der Modellbildung erreicht wurden oder nicht.

Pflichtenheft					
Lfd. Nr.	Gruppe/ Kategorie	Ziel/ Anforderung	Umsetzungsvorschläge/Lösungswege	zusätzlich erforderliche Daten und Informationen inkl. Quelle	Ziel-erreichung
0	A	B	C	D	E
1	Leistungen	Stahlbetonarbeiten	Es werden nur die Stahlbetonarbeiten (Ortbeton) im Berechnungsmodell berücksichtigt. Als Basis dienen die Berechnungsgleichungen und Parameterbezeichnungen nach Hofstadler.	Hofstadler (2007) Bauablaufplanung und Logistik. Hofstadler (2008) Schalarbeiten.	erfüllt
2		Grob-betrachtung	Es wird die gesamte Ortbetonmenge aller Bauteilgruppen für die Berechnungen herangezogen und der Gesamt-Aufwandswert für Stahlbetonarbeiten ermittelt. Als Basis dienen die Berechnungsgleichungen und Parameterbezeichnungen nach Hofstadler.	Hofstadler (2007) Bauablaufplanung und Logistik. Hofstadler (2008) Schalarbeiten.	erfüllt
3		Detail-betrachtung	Eine Detailbetrachtung je Bauteilgruppe und getrennt nach Schalen, Bewehren und Betonieren ist möglich. Detailaufwandswerte werden zu einem Gesamt-Aufwandswert zusammengefasst. Als Basis dienen die Berechnungsgleichungen und Parameterbezeichnungen nach Hofstadler. Die gezeigte Systematik kann auch auf einzelne Arbeiten oder Fertigungsabschnitte umgelegt werden.	Hofstadler (2007) Bauablaufplanung und Logistik. Hofstadler (2008) Schalarbeiten.	teilweise erfüllt
4	Bauzeit	Normale Bauzeit	Eine normale Bauzeit ist dadurch definiert, dass die Anzahl der Arbeitskräfte und die Anzahl der Geräte, welche produktiv eingesetzt werden sollen, die jeweiligen Maximalwerte um 10 % unterschreiten. Die tägliche Arbeitszeit beträgt 8 h/d. Es kommt zu keinen Produktivitätsverlusten.	Kriterien, die eine normale Bauzeit definieren	erfüllt
5		Bauzeitverkürzung	Die normale Bauzeit wird der vorgegeben Bauzeit gegenübergestellt. Die Bauzeitverkürzung wird dabei als prozentueller Wert gegenüber der normalen Bauzeit eingegeben.		erfüllt
6		Bauzeitverlängerung	Das Modell ist nur auf Bauzeitverkürzungen ausgelegt, da eine zu lange Bauzeit nach Angabe der ExpertInnen eher selten vorkommt.		nicht erfüllt
7		Bauzeitbegrenzung	Ist die Bauzeit durch die Vorgabe des AG begrenzt, müssen bei zu kurzer Bauzeit Forcierungsmaßnahmen getroffen werden, um diese einhalten zu können. Eine nach oben hin unbegrenzte Bauzeit wird nicht untersucht, da hier die Ressourcen vom AN so eingesetzt werden können, dass keine Produktivitätsverluste entstehen.		teilweise erfüllt
8	Berücksichtigung von Nichtlinearitäten	Kurvenverläufe	Kurvenverläufe für einzelne Produktivitätsverluste stammen aus der Auswertung der Ergebnisse einer ExpertInnenbefragung, die von Hofstadler an der TU Graz durchgeführt wurden. Die Kurven sind durch Polynome bestimmt, deren Parameter individuell verändert und angepasst werden können.	Hofstadler (2014) Produktivität im Baubetrieb. Hofstadler/Kummer (2014) Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation.	erfüllt
9			Mittlere Temperaturdaten für das Jahr wurden den Angaben der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) entnommen und den Berechnungen zugrunde gelegt. Für die probabilistischen Berechnungen werden die Temperaturdaten der ZAMG in Normalverteilungen übergeführt und als Input herangezogen.	Temperaturdaten für Orte in Österreich – ZAMG	erfüllt
10			Ein Kurvenverlauf für die Mittellohnkosten in Abhängigkeit der vorgegebenen Bauzeit wurde im Modell nicht integriert.		nicht erfüllt
11	Produktivitätsverluste	Krankkapazität	Die Kurvenverläufe für Produktivitätsverluste bzw. Aufwandserhöhungen stammen aus der Auswertung der Ergebnisse einer ExpertInnenbefragung, die von Hofstadler an der TU Graz durchgeführt wurde.	Hofstadler (2014) Produktivität im Baubetrieb. Hofstadler/Kummer (2014) Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation.	erfüllt
12		Arbeitsraum			
13		Tägliche Arbeitszeit			
14		Nicht optimale Arbeitsgruppen- bzw. Kolonnengröße			
15		Lichtverhältnisse			
16		Temperatur			
17		Einsatzortwechsel			
18	Planvorlauf/ Planqualität	Für zu kurze Planvorlaufzeiten/mangelnde Planungsqualität sind aus der zitierten ExpertInnenbefragung aktuell noch keine Kurvenverläufe für Stahlbetonarbeiten publiziert, weshalb auf die Implementierung dieses Produktivitätsverlustes verzichtet wird.	nicht erfüllt		

Tab. 7-3 Pflichtenheft für ein Berechnungsmodell zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten – Teil 1

<sup>21</sup> Nach DIN 69901-5:2009, S. 10, handelt es sich bei einem Pflichtenheft um „vom Auftragnehmer erarbeitete Realisierungsvorgaben auf der Basis des vom Auftraggeber vorgegebenen Lastenheftes“.

Pflichtenheft					
Lfd. Nr.	Gruppe/Kategorie	Ziel/Anforderung	Umsetzungsvorschläge/Lösungswege	zusätzlich erforderliche Daten und Informationen inkl. Quelle	Ziel-erreichung
0	A	B	C	D	E
20	Kombination von Produktivitätsverlusten	Addition	Die Addition der Produktivitätsverluste wird in einer eigenen Spalte durchgeführt und kann damit direkt mit den Ergebnissen der Aggregation verglichen werden.		erfüllt
21		Aggregation	MS Excel bietet die Möglichkeit durch "Zirkelbezüge" iterative Berechnungen ausführen zu können.	Aktivierung der iterativen Berechnungen in MS Excel	erfüllt
22	Gleichzeitigkeit mehrerer Produktivitätsverluste	Auswahl der Produktivitätsverluste	Durch die Eingabe von "0" oder "1" in eine Prüfwelle je Produktivitätsverlust, erfolgt die Auswahl, ob die Auswirkungen des spezifischen PV in der Berechnung berücksichtigt werden sollen oder nicht.	Bei falscher Eingabe (nicht "0" oder "1") erscheint ein automatischer Hinweis.	erfüllt
23	Benutzerfreundlichkeit	Erweiterbarkeit	Das Berechnungsmodell wird in MS Excel ohne die Verwendung von Makros oder den Einsatz von VBA-Elementen erstellt, um die Erweiterungen auch ohne Programmierkenntnisse vornehmen zu können.		erfüllt
24		Farbliche Kennzeichnungen	Eingabezellen erhalten eine andere Zelleneinfärbung als Ausgabezellen.		erfüllt
25	Berechnungsverfahren	Deterministische Berechnungen	Eingabeparameter können individuell, als deterministische Zahlenwerte, oder als Verteilungsfunktionen definiert werden.		erfüllt
26		Probabilistische Berechnungen		Für probabilistische Berechnungen wird das Programm @Risk eingesetzt	erfüllt
27	Unsicherheiten	Inputparameter	Inputparameter können individuell mit Verteilungsfunktionen belegt werden.	Erfordert die Aktivierung des Programms @Risk	erfüllt
28			Die Eingabe historischer Daten wird nicht explizit im Programm integriert, kann aber durch eine Erweiterung auf weitere Tabellenblätter individuell erfolgen.		teilweise erfüllt
29	Korrelationen	Korrelationen	Die Berücksichtigung von Korrelationen ist grundsätzlich möglich. Für die Ermittlung des Grund-Gesamt-Aufwands werden die Berechnungsparameter entsprechend der Ergebnisse der ExpertInnenbefragung (Kummer/Hofstadler) miteinander korreliert.	Ergebnisse der ExpertInnenbefragung (Kummer/Hofstadler)	erfüllt
30	Optimierungen	Forcierungen	Optimierungen einer Variablen können durch Zielwertsuchen in MS Excel erfolgen. Für mehrdimensionale Optimierungsprobleme empfiehlt sich der Einsatz entsprechender Softwareprogramme.	Erfordert den Einsatz des Programms @Risk (Optimierungstool: RISKOptimizer)	nicht erfüllt
31		Pönalen	Strafzahlungen (Pönalen) werden im Berechnungsmodell nicht berücksichtigt.		nicht erfüllt

Tab. 7-4 Pflichtenheft für ein Berechnungsmodell zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten – Teil 2

## 7.7 Optimierungen mittels Simulation

Sind Eingangsparameter eines Berechnungsmodells unsicher oder sind unterschiedliche Ausprägungen dieser Variablen möglich, kann es von Interesse sein, nicht nur die unterschiedlichen Ergebnisse dieser möglichen Szenarien in Form eines zusammenfassenden Histogramms darzustellen und zu analysieren, sondern eine Empfehlung für jene steuerbaren Parameter zu erhalten, die in Kombination z.B. die geringsten Kosten bzw. die geringsten Produktivitätsverluste verursachen.

Es handelt sich dabei um ein (u.U. mehrdimensionales) Optimierungsproblem, dessen Lösung aufgrund der stochastischen Einflüsse mit Hilfe von Simulationen und einer entsprechenden probabilistischen Optimierungsoftware<sup>22</sup> angenähert werden kann.

<sup>22</sup> z.B. das in @Risk integrierte Optimierungswerkzeug RISKOptimizer.

### 7.7.1 Grundlagen zur Optimierung

Die Optimierung mit Hilfe von Simulationsmodellen wird allgemein dem Operations Research (OR) bzw. der mathematischen Entscheidungsvorbereitung zugeordnet.<sup>23</sup>

Für die Entwicklung der Berechnungsmodelle sind sowohl Kenntnisse über die praktischen Probleme und das betriebliche Umfeld als auch über die Fähigkeiten und Grenzen der OR-Methoden erforderlich. Es handelt sich daher grundsätzlich um interdisziplinäre Projekte.<sup>24</sup>

„Simulation kann im sprachlichen Gebrauch viele Bedeutungen annehmen. So kann „Simulieren“ bedeuten, dass man sich verstellt oder etwas vortäuscht, aber auch, dass man eine bestimmte Handhabung nachahmt. Operations Research [...] verstehen unter Simulation die Nachahmung einer realen Situation durch ein Modell, das auf einem Rechner abläuft. Anstatt einer analytischen Lösung eines gegebenen Problems wird bei der Simulation eine Annäherung an die optimale Lösung durch ein experimentelles Ausprobieren einer Vielzahl von Möglichkeiten durchgeführt.“<sup>25</sup>

Eine einseitige Optimierung würde zwar zu einem lokalen Optimum führen, global betrachtet ist das Optimierungspotential jedoch durch die Kombination unterschiedlicher Parameter höher.

Die zu optimierenden Größen sind immer mit nicht vermeidbaren Streuungen behaftet. In Abb. 7-10 sind solche nicht vermeidbaren Streuungen für zwei Entscheidungsvariablen (X und Y) schematisch dargestellt.

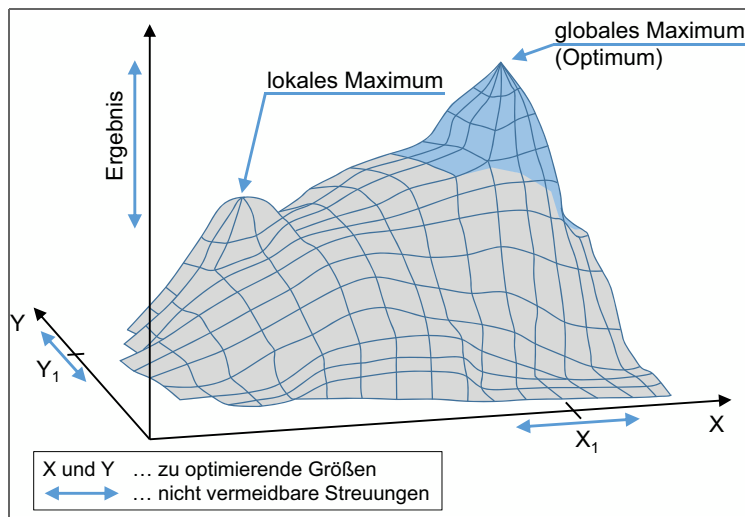


Abb. 7-10 Qualitative Darstellung für die Ermittlung eines globalen Optimums für zwei zu optimierende Größen inkl. nicht vermeidbarer Streuungen<sup>26</sup>

Damit ein Optimierungsalgorithmus ein globales Optimum finden kann, muss es in einem gewissen Maße auch Verschlechterungen in Hinblick auf das gesuchte Ergebnis zulassen. Werden nur Verbesserungen zugelassen, kann

<sup>23</sup> Hofmann/Pacyna (1997). Lösung ingenieurtechnischer Aufgaben durch Anwendung der multiplen, nicht-linearen Einflußgrößenrechnung. S. 9ff

<sup>24</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 7

<sup>25</sup> Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 13

<sup>26</sup> Vgl. Voigt (2008). Grundlagen der Probabilistik. Folie 62

meist nur ein lokales Optimum gefunden werden. Dafür gelangen heuristische Optimierungsverfahren (z.B. Simulated Annealing, Threshold Accepting, Great Deluge und Tabu Search) oder auch naturanaloge Metaheuristiken (z.B. genetische Algorithmen) zum Einsatz.<sup>27</sup>

Das Problem lokaler Suchen besteht darin, dass ein globales Optimum nicht gefunden werden kann, sondern der Algorithmus bei Auftreten eines lokalen Optimums zu keinen besseren Lösungen mehr kommt. Dies kann mit der Suche nach dem höchsten Punkt in einem dreidimensionalen Gelände verglichen werden (siehe Abb. 7-10). Bei einer lokalen Suche beginnt man an einem beliebigen Punkt (im „Gelände“) und tastet sich (quasi) blind zum nächsten (benachbarten) Punkt vor. Als Suchkriterium wird nur die „Schwere“ herangezogen, also ob man sich nach oben oder unten bewegt. Dieses eingeschränkte Suchkriterium kann dazu führen, dass keine besseren Lösungen (hier: höhere Punkte im „Gelände“) gefunden werden können. Verbesserte Optimierungsverfahren können Entscheidungen im Suchprozess revidieren („Backtracking-Verfahren“) oder auch schlechtere Lösungen zulassen, um dadurch in einen anderen „Lösungsbereich“ zu gelangen und dort nach einem noch besseren Optimum zu suchen.<sup>28</sup>

### 7.7.2 Regelkreis der Optimierung

Im Zusammenspiel von Simulation und Optimierung wird mit Hilfe der Simulationsergebnisse die Zielfunktion (zu optimierende Größe) berechnet. Das Simulationsmodell stellt dabei eine „Black Box“ dar, die den Zusammenhang zwischen den Entscheidungsvariablen und den Zielvariablen herstellt. Parameter die nicht gesteuert werden können, wirken zusätzlich als Zufallseinflüsse in die Simulation mit ein. Eine Auswahl möglicher Ausprägungen der anzupassenden Größen werden vom Optimierungsprogramm an die Simulation übergeben, um damit einen Simulationsdurchlauf ausführen zu können. Die Ergebnisse dieser Simulation werden dann wieder an das Optimierungsprogramm übermittelt. Dieses verändert aufgrund der Ergebnisse der Simulation, der definierten Nebenbedingungen und der Zielfunktion die Variablen und gibt sie wiederum an das Simulationsmodell zurück. Dieser Kreislauf erfolgt solange, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird. Mögliche Abbruchkriterien können eine bestimmte Laufzeit, eine bestimmte Zeit in der keine besseren Ergebnisse gefunden wurden oder das Überschreiten eines gewissen Niveaus für die Zielgröße sein.<sup>29</sup>

Der Vorgang zur probabilistischen Optimierung durch vernetzte Elemente, in Form eines Regelkreises<sup>30</sup>, der den iterativen Lösungs- bzw. Findungsprozess abbildet, wird in Abb. 7-11 gezeigt.

Das Führungsglied gibt die Arbeitsanweisungen für den Regelkreis vor und legt die Zielgröße und die zu optimierende(n) Größe(n) fest. Weiters werden die relevanten Informationen (z.B. Grenzen der variablen Parameter, Angaben zu unsicheren Parametern, Straffunktionen) bereitgestellt. Die Einengung von Bandbreiten bzw. die Konkretisierung der Parameter hilft dabei, den Aufwand für die Optimierung zu reduzieren. Die Arbeitsanweisung des Führungsglieds sollte dabei an das konkrete Projekt angepasst sein.

<sup>27</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 293

<sup>28</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 136ff

<sup>29</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 292

<sup>30</sup> Regelkreise bilden geschlossene, sich wiederholende Abläufe in Form von Wirkungszusammenhängen systematisch ab.

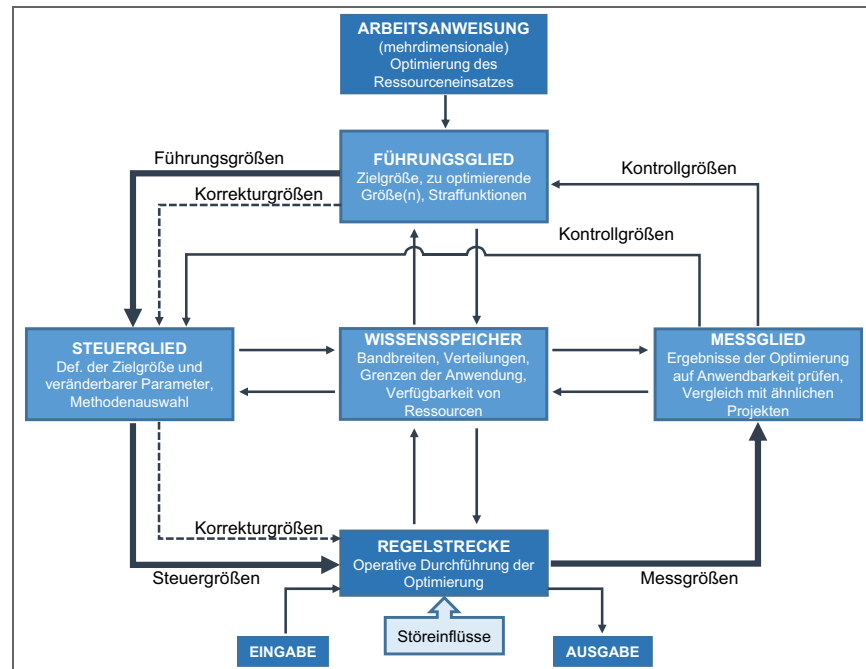


Abb. 7-11 Regelkreis für die probabilistische Optimierung<sup>31</sup>

Das Steuerglied nimmt die Arbeitsanweisung, die Ziele und relevante Informationen auf und prüft diese auf Vollständigkeit, Anwendbarkeit und Klarheit. Treten Unklarheiten auf, oder sind weitere Angaben erforderlich, kann auf den Wissenspeicher zurückgegriffen werden oder es erfolgt eine Rückkopplung an das Führungsglied. Sind die Führungsgrößen klar, werden die Zielgröße und die veränderlichen Parameter sowie die Vorgaben für die einzusetzenden Methoden definiert.

Steuergrößen sind z.B.:

- definierter Untersuchungsgegenstand
- definierter Untersuchungsbereich
- zeitlicher Horizont, bis zum Abschluss der Optimierung
- Art der Vorgehensweise (unsystematisch durch „Probieren“ oder systematisch mit Hilfe von Softwareprogrammen)
- einzusetzende Software
- Zielgröße
- veränderliche Parameter
- Straffunktionen

Mit den definierten Steuergrößen führt die Regelstrecke die Optimierung operativ durch. Für probabilistische Optimierungen ist ein entsprechendes Simulationsmodell zu erstellen und durch den Einsatz spezifischer Softwarelösungen die Optimierung durchzuführen.<sup>32</sup> Treten im Zuge der Modeller-

<sup>31</sup> Regelkreis angelehnt an Hofstadler (2008), Schararbeiten, S. 240ff

<sup>32</sup> Auf die exakte Vorgehensweise bei probabilistischen Optimierungen wird nicht eingegangen. Hier wird auf einschlägige Literatur zur probabilistischen Optimierung bzw. auf Benutzerhandbücher entsprechender Softwarelösungen verwiesen.

stellung bzw. während des Optimierungsvorgangs Unklarheiten auf, kommt es zu Rückkoppelungen mit dem Steuerglied.

In der Regelstrecke wird anhand der Eingaben, Steuer- bzw. Korrekturgrößen und der Informationen aus dem Wissensspeicher die Optimierung durchgeführt. Die Bearbeitung ist dabei zeitlich und ressourcenmäßig begrenzt.

Ein geeignetes Werkzeug kann z.B. eine Optimierungssoftware sein, die durch die Auswahl und Anwendung verschiedener Algorithmen mögliche Lösungen findet. Durch den iterativen Vorgang im Zuge der Optimierung kommt es zu ständigen Anpassungen der veränderbaren Variablen, bis letztendlich der optimale Ressourceneinsatz angegeben werden kann (bei probabilistischen Optimierungen sind die veränderbaren Größen mit Streuungen belegt – vgl. Abb. 7-10). Grundlage für eine probabilistische Optimierung ist ein Simulationsmodell, das Nichtlinearitäten und Unsicherheiten überhaupt berücksichtigt. Die Ausgabe – das Ergebnis der Regelstrecke – sind Empfehlungen für die Wahl der veränderbaren Parameter, um die definierte Zielgröße (z.B. die geringsten Kosten) für ein konkretes Projekt zu optimieren.

Störeinflüsse auf die Regelstrecke können sowohl externer als auch interner Natur sein. Ändern sich die Rahmenbedingungen des gesamten Projekts oder von Teilbereichen, hat dies auch Auswirkungen auf die Optimierung bzw. auf die veränderbare(n) Größe(n) oder die Zielgröße. Interne Störeinflüsse können durch den Ausfall erfahrener Mitarbeiter, falsche Schwerpunktsetzung, ungeeignete Optimierungsmethoden oder unadäquate Darstellungsformen sowie Fehler in der Modellierung oder bei der Eingabe der Optimierungsbedingungen auftreten. Störeinflüsse haben Auswirkungen auf die Regelstrecke und damit auf den Vorgang der Optimierung. Sie müssen entweder durch die Regelstrecke selbst oder durch das Führungs- bzw. Steuerglied bewältigt werden.

Das Messglied überprüft, ob die Vorgaben, die sich aus den Führungs- und Steuergrößen ergeben, eingehalten wurden und ob die Ergebnisse der Optimierung überhaupt plausibel und anwendbar sind.

Falls Daten und Informationen von vergleichbaren Projekten vorliegen, bietet es sich an, diese für die Überprüfung heranzuziehen. Dazu greift das Messglied idealerweise auf einen Wissensspeicher zu, in dem systematisch nach den spezifischen Daten und Informationen gesucht werden kann. Der Wissensspeicher steht nicht nur passiv für den gesamten Regelkreis zur Verfügung, sondern ist vom aktiven Regelkreis wieder mit neuen Daten und Informationen zu versorgen.




Vom Messglied werden die Kontrollgrößen je nach internen Regeln an das Führungs- bzw. Steuerglied weitergegeben. Anhand der Kontrollgrößen kann festgestellt werden, ob die definierten Ziele erreicht wurden oder ob der Bedarf für Gegensteuerungsmaßnahmen gegeben ist. Sind Gegensteuerungsmaßnahmen erforderlich, werden dazu adäquate Korrekturgrößen festgelegt.

Mit den Korrekturgrößen wird von der Regelstrecke ein neuer Bearbeitungszyklus ausgelöst. Dieses Ergebnis wird vom Messglied wieder einer Analyse unterzogen und die daraus resultierenden Kontrollgrößen weitergegeben. Der Regelkreis wird so lange durchlaufen, bis die erwartete Qualität der Optimierung erreicht ist und/oder die Zeit für die Bearbeitung abgelaufen ist.

### 7.7.3 Einflüsse auf die Qualität der Optimierung

Aufgrund der meist hohen Komplexität der Simulationsmodelle und der Tatsache, dass das Optimierungsprogramm den Aufbau des Modells nicht kennt („Black Box“), ist der Einsatz von Optimierungsverfahren zur Suche nach „exakten Lösungen“ kaum möglich. Dies trifft insbesondere bei stochastischen, dynamischen Simulationsmodellen zu, da es aufgrund der Zufallsvariablen keine exakte Lösung geben kann.<sup>33</sup>

Einflüsse auf die Komponenten (Realität, Berechnungsmodell, Computer bzw. Optimierungssoftware) eines Optimierungssystems sind in Tab. 7-5 demonstrativ aufgezählt.

Modellobjekt (reales System)	Berechnungsmodell	Computer bzw. Optimierungssoftware
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Unsichere Einflüsse und Größen</li> <li>■ Menschliches Versagen</li> <li>■ Ändernde Umstände</li> <li>■ Äußere Einflüsse</li> <li>■ Gegebene Kapazitäten</li> <li>■ Vorgegebene Bauzeit</li> <li>■ Restriktionen (Einschränkungen, Limitierungen – logisch, physikalisch, rechtlich, technische, baubetriebliche oder bauwirtschaftliche)</li> <li>■ Problemanalyse</li> <li>■ Prüfung der Anwendbarkeit von Lösungen</li> <li>■ Zielbestimmung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Annahmen</li> <li>■ Quantifizierung</li> <li>■ Abstraktion</li> <li>■ Vereinfachungen</li> <li>■ Inputs – Wahl von Verteilungen</li> <li>■ Bandbreiten der Inputs</li> <li>■ subjektive/objektive Wahrscheinlichkeiten</li> <li>■ Korrelationen</li> <li>■ Nichtlinearitäten</li> <li>■ Bestimmung der Zielgröße</li> <li>■ Festlegen von anpassbaren Größen</li> <li>■ Definition von Restriktionen</li> <li>■ Straffunktionen</li> <li>■ Datensammlung</li> <li>■ ExpertInnenmeinungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Softwareprogramm</li> <li>■ Rechenkapazität</li> <li>■ Anwendung</li> <li>■ Bedienbarkeit</li> <li>■ Rechenzeit</li> <li>■ Lösungsbewertung</li> <li>■ Auswahl von Optimierungsalgorithmen</li> <li>■ Eingabefehler</li> <li>■ Ergebnisvisualisierung</li> </ul>

Tab. 7-5 Demonstrative Einflüsse auf Komponenten eines Optimierungssystems

Restriktionen (Einschränkungen) bei Optimierungsproblemen sind typischerweise Kapazitätsgrenzen in der Produktion (Auftreten von Produktivitätsverlusten) oder die Verfügbarkeit von Rohstoffen, Arbeitskräften oder Geräten. Weiters zählen logische, physikalische, rechtliche, technische, baubetriebliche oder bauwirtschaftliche Grenzen dazu.<sup>34</sup>

Es sind grundsätzlich zwei Typen von Restriktionen – harte und weiche – in Optimierungsmodellen möglich. Harte Restriktionen müssen exakt eingehalten werden, während bei weichen Restriktionen gewisse Abweichungen erlaubt sind.<sup>35</sup>

Aufgrund von Erfahrungen oder Intuition der Entscheidungsträger sowie

<sup>33</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 293

<sup>34</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 33

<sup>35</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 106  
Bei weichen Restriktionen werden in weiterer Folge meist „Straffunktionen“ definiert, die sich bei Über-/Unterschreitung negativ auf die Zielgröße auswirken.



aufgrund von Firmenpolitik, Prestige- oder Imagegewinn bzw. „weichen“ Entscheidungsfaktoren kann es sein, dass das mathematisch ermittelte Optimum abgelehnt wird. Trotzdem bietet das Ergebnis einer mathematischen Optimierung zahlreiche Vorteile. Es kann beispielsweise abgeschätzt werden, welches Optimierungspotential durch eine abweichende Entscheidung verloren geht oder Sensitivitätsanalysen für Entscheidungen durchgeführt werden. Damit können die Entscheidungsträger wertvolle Informationen über das Verhalten des Systems erhalten und im weiteren Vorgehen berücksichtigen.<sup>36</sup>

Das in dieser Arbeit gezeigte konzeptionelle Vorgehen für die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten stellt den Grundstein für zukünftige Entwicklungen und den operativen Einsatz von probabilistischen Optimierungsverfahren dar.

## 7.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde auf die Grundlagen der Modellierung und die Vorgehensweise bei der Erstellung eines Berechnungsmodells, welches Nichtlinearitäten und Unsicherheiten für die Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten berücksichtigt, eingegangen. Dazu wurde in einem Überblick auf den Umgang mit Informationen und den schematischen Ablauf der Dokumentation eingegangen. Der qualitative Wirkungszusammenhang für die konkrete Aufgabenstellung wurde anhand eines Wirkungsgraphen (Grobbeachtung) bzw. eines Ablaufdiagramms (Detailbeachtung) dargestellt. Die mathematischen Zusammenhänge der Addition und Aggregation von Produktivitätsverlusten bei vorgegebener Bauzeit wurden möglichst einfach und verständlich in Form von Gleichungen dargestellt. Die Ziel- und Wegbeschreibung des geforderten Modells erfolgte in Form eines tabellarisch aufgelisteten Lasten- bzw. Pflichtenhefts. Am Ende des Kapitels wurde eine Einführung in die (mehrdimensionale) Optimierung mittels Simulationen gegeben und durch die Beschreibung eines Regelkreises veranschaulicht.

<sup>36</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2013). Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. S. 89f



## 8 Anwendungsbeispiel

In diesem Kapitel wird ein Berechnungsbeispiel für die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bzgl. des Gesamt-Aufwandswerts für Stahlbetonarbeiten gezeigt. Im Zentrum steht dabei die Kombination unterschiedlicher Produktivitätsverluste, wobei zunächst deterministische und dann probabilistische Berechnungen für die Addition und Aggregation durchgeführt werden.<sup>1</sup>

### 8.1 Beschreibung der Ausgangssituation (Angabe)

Das Beispiel bezieht sich auf die Mengen- und Bauzeitvorgaben des Musiktheaters Linz (siehe Abb. 8-1). Alle weiteren Eingangsgrößen (Aufwandswerte, Anzahl der Arbeitskräfte etc.) wurden aufgrund eigener Annahmen festgelegt.

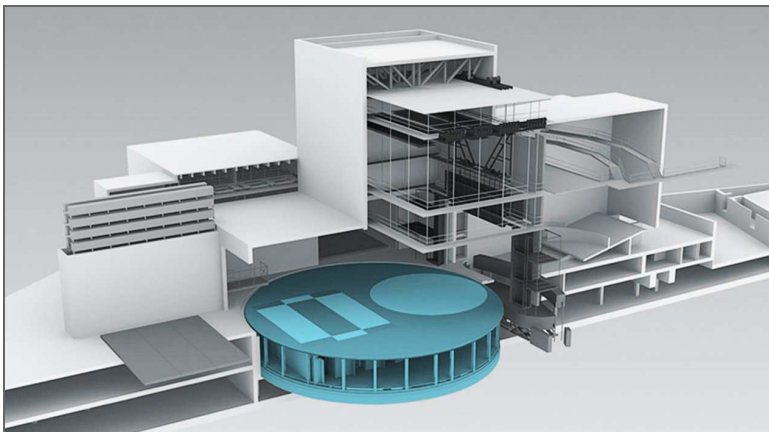


Abb. 8-1 Musiktheater Linz – 3D-Visualisierung – Schnitt<sup>2</sup>

Es wird angenommen, dass die Bauzeit für die Stahlbetonarbeiten nicht der „normalen“ Bauzeit entspricht und vom AG kürzer vorgegeben wurde. Der AN kann seine Produktionsfaktoren demnach nicht mit der normalen Arbeitsproduktivität einsetzen. Anhand einer Grobbetrachtung wird untersucht, welche Auswirkungen aufgrund von Produktivitätsverlusten durch die verkürzte Bauzeit zu erwarten sind.

Die Schalungsflächen sowie Bewehrungs- und Betonmengen für das gegenständliche Bauvorhaben sind in Tab. 8-1 getrennt nach Bauteilgruppen sowohl als absolute Werte als auch als Prozentwerte angeführt.

<sup>1</sup> Die Berechnungen wurden in MS Excel durchgeführt, wobei die Nachkommastellen bei nachfolgenden Berechnungsschritten mitberücksichtigt werden. Es kann daher beim händischen Nachrechnen – aufgrund von Rundungen – zu geringfügigen Abweichungen gegenüber den dargestellten Ergebnissen kommen.

<sup>2</sup> <http://www.waagner-biro.com/de/sparten/buehrentechnik/referenzen>. Datum des Zugriffs: 26.10.2014

Lfd. Nr.	Bauteile	Schalungsfläche		Bewehrungsmenge		Betonmenge	
		[m <sup>2</sup> ]	[%]	[t]	[%]	[m <sup>3</sup> ]	[%]
0	A	B	C	D	E	F	G
1	Bodenplatte	1.150	0,90	1.500	30,41	9.600	25,08
2	Wände	81.000	63,65	1.500	30,41	15.500	40,50
3	Stützen	3.700	2,91	120	2,43	400	1,05
4	Balken, Träger	9.200	7,23	242	4,91	1.885	4,92
5	Decken	31.700	24,91	1.550	31,43	10.800	28,22
6	Treppen	500	0,39	20	0,41	90	0,24
7	<b>Summe</b>	<b>127.250</b>	<b>100,00</b>	<b>4.932</b>	<b>100,00</b>	<b>38.275</b>	<b>100,00</b>

Tab. 8-1 Mengenermittlung – Musiktheater Linz

Um die Stahlbetonarbeiten in der zur Verfügung stehenden Zeit erbringen zu können, muss der Ressourceneinsatz gegenüber dem normalen Einsatz erhöht werden, da die mittlere erforderliche tägliche Leistung ( $L_{\text{STB,ERF}}$ ) höher ist, als bei einer normalen Bauzeit. Diese höhere Leistung kann z.B. durch die Erhöhung der Arbeitskräfteanzahl ( $AK_{\text{MW}}$ ) oder der täglichen Arbeitszeit ( $AZ$ ) erreicht werden (siehe Glg. (8-1)). Denkbar wäre auch die Verringerung des Aufwandswerts ( $AW_{\text{STB}}$ ) z.B. durch effizientere Bauverfahren oder logistische Verbesserungen des Bauablaufs.<sup>3</sup> Weiters sind Kombinationen dieser Forcierungsmaßnahmen möglich.

$$L_{\text{STB,ERF}} = \frac{AZ \cdot AK_{\text{MW}}}{AW_{\text{STB}}} \quad (8-1)$$

Es wird untersucht, welche Auswirkungen eine verkürzte Bauzeit auf den Gesamt-Aufwandswert der Stahlbetonarbeiten  $AW_{\text{STB}}$  [Std/m<sup>3</sup>] und in weiterer Folge auf die Lohnkosten verursacht. Dazu werden unterschiedliche Kombinationen an Produktivitätsverlusten betrachtet und sowohl deterministische als auch probabilistische Berechnungen durchgeführt. Die probabilistischen Betrachtungen ermöglichen es, Unsicherheiten der Eingangsparameter in die Berechnungen zu integrieren sowie Chancen und Risiken hinsichtlich der Aufwandswerte zu beurteilen.

## 8.2 Ermittlung der normalen Bauzeit

Im Zuge des Anwendungsbeispiels wird eine Grobbetrachtung durchgeführt, die sich auf die Stahlbetonarbeiten (Ortbeton) bezieht. Die gesamte Stahlbetonmenge beträgt lt. Ausschreibung 38.275,00 m<sup>3</sup> (Tab. 8-2 – Zeile 3). Der Grund-Gesamt-Aufwandswert wird für das deterministische Beispiel mit 6,00 Std/m<sup>3</sup> angesetzt.<sup>4</sup> Für eine normale Bauzeit wird erwartet, dass dieser Aufwandswert für die Stahlbetonarbeiten erzielt wird. Durch die verkürzte Bauzeit werden in weiterer Folge die Einflüsse auf diesen Aufwandswert untersucht. Die tägliche Arbeitszeit beträgt 8,00 h/d (Tab. 8-2 – Zeile 2).

Für die Ermittlung der normalen Bauzeit wird die Anzahl der Krane mit 5 und der Kranproportionalitätsfaktor mit maximal 20 AK/Kran (Betonieren ohne Kran – siehe Tab. 4-2; Seite 89) angesetzt. Die normale Bauzeit ist so festgelegt, dass die Anzahl der Arbeitskräfte und die Anzahl der Geräte,

<sup>3</sup> z.B. Verringerung des Anteils für die Verteilzeiten.

<sup>4</sup> Dieser angesetzte Grund-Gesamt-Aufwandswert entspricht dem normalen Einsatz der Produktionsfaktoren, ohne Verluste. Quelle für einen solchen Grund-Gesamt-Aufwandswert sind im Idealfall eigene Erfahrungen bei ähnlichen Projekten, die durch ein entsprechendes Informations- und Wissensmanagement erhoben wurden.

welche produktiv eingesetzt werden sollen, die jeweiligen Maximalwerte um 10 % (Tab. 8-2 – Zeile 6) unterschreiten (siehe auch Abschnitt 4.4 – Seite 88ff).

Der Berechnung der normalen Bauzeit werden daher nicht 20 AK/Kran für den Kranproportionalitätsfaktor, sondern ein um 10 % verminderter Wert (= 18 AK/Kran – siehe Tab. 8-2 – Zeile 7) zugrunde gelegt.

Ermittlung der normalen Bauzeit		
Lfd. Nr.	Gegenstand	Wert
0	A	B
1	Grund-Gesamt-Aufwandswert	6,00 Std/m <sup>3</sup>
2	Tägliche Arbeitszeit	8,00 h/d
3	Betonmenge	38.275,00 m <sup>3</sup>
4	Anzahl der Krane (max. baubetrieblich möglich)	5,00 Krane
5	Maximaler Kran-Proportionalitätsfaktor	20,00 AK/Kran
6	Unterschreitung der Maximalwerte	10,00 %
7	Normaler Kran-Proportionalitätsfaktor	18,00 AK/Kran
8	Maximale Anzahl an AK für eine normale Bauzeit	90,00 AK
9	Arbeitskräfteverhältnis	0,80 -
10	Mittlere Anzahl an AK für eine normale Bauzeit	72,00 AK
11	Tägliche Leistung	96,00 m <sup>3</sup> /d
12	<b>Normale Bauzeit</b>	<b>398,70 d</b>

Tab. 8-2 Ermittlung der normalen Bauzeit

Die maximale Anzahl der Arbeitskräfte errechnet sich in Zeile 8 mit 90 AK (= 18 AK/Kran · 5 Krane). Für die weitere Berechnung ist die mittlere Anzahl an Arbeitskräften erforderlich, die sich durch den Ansatz eines Trapezmodells für die Verteilung der Ressourcen über die Bauzeit ergibt. Der Faktor für das Arbeitskräfteverhältnis (= mittlere Anzahl an AK / maximale Anzahl an AK) wird für dieses Beispiel mit 0,80 angesetzt.<sup>5</sup> Die mittlere Anzahl an Arbeitskräften ergibt sich in Zeile 10 mit 72 AK (= 90 AK · 0,80).

Die mittlere tägliche Normalleistung wird in weiterer Folge aus dem Produkt der täglichen Arbeitszeit und der mittleren Arbeitskräfteanzahl, dividiert durch den Grund-Gesamt-Aufwandswert, ermittelt – diese beträgt 96,00 m<sup>3</sup>/d (= 8,00 h/d · 72 Std/h / 6,00 Std/m<sup>3</sup>).

Wird die gesamte Stahlbetonmenge durch die mittlere Normalleistung dividiert, ergibt sich die normale Bauzeit in Zeile 12 mit ca. 399 d (= 38.275,00 m<sup>3</sup> / 96,00 m<sup>3</sup>/d).

Vom AG wurde für die Stahlbetonarbeiten eine um 25 % verringerte Bauzeit vorgegeben. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 100 d (= 398,7 d · 0,25). Bei unveränderter Betonmenge (38.275,00 m<sup>3</sup>) entspricht die durchschnittliche erforderliche Leistung einem Wert von 128 m<sup>3</sup>/d (= 38.275,00 m<sup>3</sup> / 299 d).

Diese Leistung muss durch Anpassung des Ressourceneinsatzes erreicht werden, wobei das nichtlineare Verhalten der Leistung bzw. der Aufwandswerte in Form von Produktivitätsverlusten berücksichtigt wird.

<sup>5</sup> Je höher dieser Faktor ist, desto mehr nähert sich die angenommene Trapezverteilung der Produktionsfaktoren (siehe Abb. 6-12; Seite 230) einem Rechteck an. Bei einem Faktor von 1 sind die maximale und die mittlere Anzahl der Arbeitskräfte identisch – es gibt dann keine Anlauf- und/oder Auslaufphase.

Nachfolgende Einzelproduktivitätsverluste werden hinsichtlich der Aufwandswerterhöhung untersucht:

- Verringerte Krankkapazität
- Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche
- Erhöhte tägliche Arbeitszeit
- Veränderte Lichtverhältnisse
- Veränderte Arbeitsgruppengröße  
(Verkleinerung bzw. Vergrößerung der Arbeitsgruppe)
- Nicht optimale Tagestemperatur

Mit diesen Einzelproduktivitätsverlusten können auch die Kombinationen aus der durchgeführten ExpertInnenbefragung (siehe Abschnitt 6.6.1) im Berechnungsmodell berücksichtigt werden.

### 8.3 Grenzgrößen der Produktivitätsverluste

Nachfolgend wird auf die Grenzgrößen der betrachteten Produktivitätsverluste näher eingegangen.

#### 8.3.1 Verringerte Krankkapazität

Wie bereits aus der Berechnung der normalen Bauzeit ersichtlich, wird für das Anwendungsbeispiel angenommen, dass das Betonieren ohne die Bindung von Krankkapazitäten erfolgt. Demnach kann ein Obendreher-Kran 20 AK bedienen. Für die Ermittlung der normalen Bauzeit wurde dieser Wert um 10 % auf 18 AK/Kran reduziert und dient auch als Grenzgröße für die Berechnung der erforderlichen Anzahl an Kranen. Für das beispielhaft angenommene Baufeld wird angenommen, dass bis zu fünf Krane baubetrieblich sinnvoll installiert werden können. Die Aufwandswerterhöhung errechnet sich nach Glg. (4-2). Dieser Einzelproduktivitätsverlust wirkt sich auf alle Arbeitskräfte gleichermaßen aus.

#### 8.3.2 Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche

Für die Mindestarbeitsfläche (bei horizontalen Bauteilen) sowie für die Mindestarbeitslänge (bei vertikalen Bauteilen) wurden von Hofstadler<sup>6</sup> ExpertInnenwerte getrennt für das Schalen, Bewehren und Betonieren erhoben. Für die im gegenständlichen Beispiel durchgeführte Grobberachtung der Stahlbetonarbeiten ist es erforderlich, diese Angaben projektspezifisch zu mitteln, um eine Grenzgröße für den Einzelproduktivitätsverlust zu definieren.

Die ExpertInnenwerte zur Mindestarbeitsfläche bei Flachdecken sowie der Mindestarbeitslänge für eingeschossige Wände sind in Tab. 8-3 in den Zeilen 1 und 2 eingetragen.<sup>7</sup>

Zusätzlich ist es notwendig, eine Breite des erforderlichen Arbeitsbereichs bei vertikalen Bauteilen anzunehmen. Hier wird beim Schalen der größte (in

<sup>6</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 191ff, 209ff und 221ff

Summe 3,00 m – entspricht 1,50 m je Wandseite – siehe Zelle B3) und beim Betonieren der kleinste Arbeitsbereich angenommen (siehe Zeile 3).<sup>8</sup>

In Zeile 4 wird die Mindestarbeitslänge (Zeile 2) jeweils mit der Breite des erforderlichen Arbeitsbereichs (Zeile 3) multipliziert.

Die Mindestarbeitsflächen für Flachdecken (Zeile 1) und für Wände (Zeile 4) werden mit dem prozentuellen Anteilen der Arbeitskräfte<sup>9</sup> für horizontale (Zeile 5) und vertikale Bauteile (Zeile 6) multipliziert und ergeben die mittlere Mindestarbeitsfläche je Tätigkeit (Schalen, Bewehren und Betonieren).

Lfd. Nr.	Parameter	Berechnung der mittleren Mindestarbeitsfläche					
		Schalen		Bewehren (Stabstahl)		Betonieren	
		Wert	Einheit	Wert	Einheit	Wert	Einheit
0	A	B	C	D	E	F	G
1	Mindestarbeitsfläche – Flachdecken	29,05	m <sup>2</sup> /AK	35,62	m <sup>2</sup> /AK	44,21	m <sup>2</sup> /AK
2	Mindestarbeitslänge – Wände 2,5 m hoch – 1-geschossig	4,30	m/AK	4,73	m/AK	4,53	m/AK
3	Breite des erforderlichen Arbeitsbereichs bei vertikalen Bauteilen – Summe beider Wandseiten	3,00	m	2,00	m	1,50	m
4	Mindestarbeitsfläche – Wände	12,90	m <sup>2</sup> /AK	9,46	m <sup>2</sup> /AK	6,80	m <sup>2</sup> /AK
5	Anteil der AK – bei horizontalen Bauteilen eingesetzt	60,00	%	60,00	%	60,00	%
6	Anteil der AK – bei vertikalen Bauteilen eingesetzt	40,00	%	40,00	%	40,00	%
7	Mittlere Mindestarbeitsfläche	22,59	m <sup>2</sup> /AK	25,16	m <sup>2</sup> /AK	29,24	m <sup>2</sup> /AK
8	Kostenanteile STB – Lohn	35,00	%	11,00	%	6,00	%
9	Kostenanteile STB – Lohn – normiert	67,31	%	21,15	%	11,54	%
10	<b>Mittlere Mindestarbeitsfläche</b>	<b>23,90 m<sup>2</sup>/AK</b>					

Tab. 8-3 Berechnung der mittleren Mindestarbeitsfläche

Um eine mittlere Mindestarbeitsfläche für die Stahlbetonarbeiten insgesamt ermitteln zu können, werden die prozentuellen Lohnkostenanteile der Stahlbetonarbeiten<sup>10</sup> (Zeile 8) zunächst auf 100 % normiert<sup>11</sup> (Zeile 9) und in weiterer Folge mit den Mindestarbeitsflächen aus Zeile 7 multipliziert. Für das Anwendungsbeispiel ergibt sich die mittlere Mindestarbeitsfläche der Stahlbetonarbeiten mit 23,90 m<sup>2</sup>/AK (Zeile 10). Dieser Wert wird als Grenzgröße für die weiteren Berechnungen herangezogen.

### 8.3.3 Erhöhte tägliche Arbeitszeit

Als Grenzgröße für das Auftreten von Produktivitätsverlusten wird eine tägliche Arbeitszeit von 8 h/d gewählt. Werden die Arbeitskräfte länger eingesetzt, wird die effektiv nutzbare tägliche Arbeitszeit nach Glg. (4-4) bzw. Glg. (4-5) berechnet.

<sup>7</sup> Vereinfacht werden nur diese zwei Bauteilgruppen (Flachdecken und eingeschossige Wände) und der Einsatz von Stabstahl für das Beispiel angenommen. Die erforderliche Mindestarbeitsfläche für Mattenstahl wird um ca. 10 m<sup>2</sup>/AK größer angegeben. Ist der Einsatz von Stab- und Mattenstahl zu erwarten, ist ein gewichtetes Mittel anhand der Mengenanteile zu ermitteln. Weiters wäre auch eine detailliertere Betrachtung möglich, bei der Unterzugdecken, Bodenplatten bzw. Wände mit größeren Höhen gewichtet nach den Mengenanteilen in die Berechnung einfließen.

<sup>8</sup> Freie Annahmen der Breiten der erforderlichen Arbeitsbereiche.

<sup>9</sup> Freie Annahme.

<sup>10</sup> Die Daten stammen aus Hofstadler/Franzl (2011). Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 24. Ein projektbezogener Ansatz der Kostenanteile wäre ebenfalls möglich.

<sup>11</sup> Eine Normierung ist erforderlich, da die prozentuellen Anteile in der zitierten Quelle gemeinsam mit den Geräte- und Materialkosten angeführt sind.

### 8.3.4 Veränderte Lichtverhältnisse

Für unterschiedliche Stufen definierter Lichtverhältnisse treten nach Glg. (4-6) Aufwandswerterhöhungen für alle eingesetzten Arbeitskräfte ein. Diese veränderten Lichtverhältnisse sind jedoch nicht über die gesamte tägliche Arbeitszeit, sondern nur über einen bestimmten Zeitraum zu erwarten. Dieser kann mittels eines prozentuellen Anteils der täglichen Arbeitszeit berücksichtigt werden.

### 8.3.5 Veränderte Arbeitsgruppengröße

Für Stahlbetonarbeiten (getrennt nach Schalen, Bewehren und Betonieren) wurde von Hofstadler in einer ExpertInnenbefragung<sup>12</sup> die optimale Arbeitsgruppengröße für unterschiedliche Bauteilgruppen angegeben. Im Mittel kann die optimale Arbeitsgruppengröße je nach Bauteil zwischen 2 und 6 angegeben werden (siehe Tab. 8-4).

Lfd. Nr.	Bauteilgruppe	Optimale Arbeitsgruppengröße		
		Schalen	Bewehren	Betonieren
		[AK]	[AK]	[AK]
0	A	B	c	D
1	Bodenplatte	3	6	4
2	Wände	4	4	3
3	Stützen	2	2	3
4	Balken/Träger	3	3	3
5	Decken	5	5	4
6	Stiegen	2	2	3

Tab. 8-4 Optimale Arbeitsgruppengröße je Bauteilgruppe<sup>13</sup>

Bezogen auf die Stahlbetonarbeiten für ein konkretes Projekt ermittelt sich die mittlere optimale Arbeitsgruppengröße über die Mengenanteile der Bauteilgruppen für Schalung, Bewehrung und Beton. Für das gegenständliche Bauvorhaben gliedern sich die Mengenanteile entsprechend Tab. 8-5.

Lfd. Nr.	Bauteilgruppe	Mengenanteil		
		Schalen	Bewehren	Betonieren
		[%]	[%]	[%]
0	A	B	C	D
1	Bodenplatte	0,90	30,41	25,08
2	Wände	63,65	30,41	40,50
3	Stützen	2,91	2,43	1,05
4	Balken/Träger	7,23	4,91	4,92
5	Decken	24,91	31,43	28,22
6	Stiegen	0,39	0,41	0,24
7	<b>Summe</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

Tab. 8-5 Mengenanteile

Die anteiligen Arbeitsgruppengrößen (siehe Tab. 8-6) je Bauteilgruppe ergeben sich aus der Multiplikation der optimalen Gruppengrößen lt. Tab. 8-4 mit den prozentuellen Mengenanteilen lt. Tab. 8-5. Die mittlere Arbeitsgruppengröße je Tätigkeit errechnet sich aus der Summe der anteiligen Gruppengrößen in Zeile 7 der Tab. 8-6.

<sup>12</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb.

<sup>13</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 191; 209 und 221



Lfd. Nr.	Bauteilgruppe	Anteilige Gruppengröße		
		Schalen	Bewehren	Betonieren
		[AK]	[AK]	[AK]
0	A	B	C	D
1	Bodenplatte	0,03	1,82	1,00
2	Wände	2,55	1,22	1,22
3	Stützen	0,06	0,05	0,03
4	Balken/Träger	0,22	0,15	0,15
5	Decken	1,25	1,57	1,13
6	Stiegen	0,01	0,01	0,01
7	<b>Summe</b>	<b>4,10</b>	<b>4,82</b>	<b>3,53</b>

Tab. 8-6 Anteilige Gruppengröße

Weiters werden zur Berechnung einer mittleren optimalen Arbeitsgruppengröße der Stahlbetonarbeiten die Kostenteile für das Schalen, Bewehren und Betonieren<sup>14</sup> herangezogen, um eine Gewichtung entsprechend den normierten Kostenanteilen für den Lohn vorzunehmen. Für das konkrete Bauvorhaben wird die mittlere optimale Arbeitsgruppengröße der Stahlbetonarbeiten mit 4 AK angesetzt (siehe Tab. 8-7).

Lfd. Nr.	Bauteilgruppe	Optimale Arbeitsgruppengröße		
		Schalen	Bewehren	Betonieren
		[%]	[%]	[%]
0	A	B	C	D
1	Kostenanteile STB – Lohn	35,00	11,00	6,00
2	Kostenanteile STB – Lohn – normiert	67,31	21,15	11,54
3	<b>Optimale Gruppengröße</b>	<b>4,19</b>		

Tab. 8-7 Mittlere optimale Arbeitsgruppengröße

Die mittlere Anzahl an Arbeitskräften wird dabei rechnerisch auf Arbeitsgruppen dieser Größe aufgeteilt. Zusätzliche Arbeitskräfte werden einer weiteren Gruppe zugeordnet. Für diese werden Produktivitätsverluste bzw. Aufwandswerterhöhungen nach Glg. (4-8) bei einer Vergrößerung bzw. nach Glg. (4-10) bei einer Verkleinerung der Gruppengröße berücksichtigt. Für die restlichen Arbeitskräfte wird angenommen, dass diese ohne Produktivitätsverluste eingesetzt werden können. Im Zuge der Addition bzw. Aggregation der Produktivitätsverluste wird die Aufwandswerterhöhung in weiterer Folge wieder auf alle Arbeitskräfte umgelegt.

### 8.3.6 Nicht optimale Tagestemperatur

Der Grund-Gesamt-Aufwandswert wird unter der Bedingung angesetzt, dass die Arbeiten auch in einem optimalen Temperaturbereich ausgeführt werden. Diese optimale Temperatur wird im Zuge der Ausführung zwar in gewissen Zeitfenstern vorherrschen, aber nicht über die gesamte Bauzeit auftreten. Um Produktivitätsverluste aus nicht optimaler Tagestemperatur in die Berechnungen einbeziehen zu können, wurden zunächst Wetterdaten der ZAMG<sup>15</sup> aufbereitet.

<sup>14</sup> Vgl. Hofstadler (2008). Schalarbeiten. S. 30f

<sup>15</sup> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Für mehr als 200 Messstationen in ganz Österreich liegen online folgende Temperaturdaten je Monat bzw. für das ganze Jahr (zwischen 1971 und 2000) vor:<sup>16</sup>

- Tagesmittel  $t$  [°C] (als Monatsmittel der Temperatur ermittelt)  
Definition: Wird aus den einzelnen Tagesmitteln der Terminablesungen (um 7 und um 19 Uhr) und den beiden Extremwerten nach folgender Gleichung berechnet:  
$$t = (t_7 + t_{19} + t_{\max} + t_{\min}) / 4$$
- Mittel aller täglichen Maxima  $mt_{\max}$  [°C]  
Definition: Summe der täglichen Maxima / Anzahl der Tage
- Mittel aller täglichen Minima  $mt_{\min}$  [°C]  
Definition: Summe der täglichen Minima / Anzahl der Tage
- absolutes Maximum  $t_{\max}$  [°C]  
Definition: größtes Tagesmaximum
- absolutes Minimum  $t_{\min}$  [°C]  
Definition: kleinstes Tagesminimum

Diese wurden im Berechnungsmodell hinterlegt und können mittels Drop-Down-Menü für die jeweiligen Messstationen ausgewählt werden.

Bei Abweichungen vom optimalen Temperaturbereich (ca. zwischen 17,5 und 18,5 °C) wird die Aufwandswerterhöhung nach Glg. (4-3) berechnet. Für die deterministische Berechnung wird das Tagesmittel als Eingabewert der Berechnung verwendet. Bei der probabilistischen Berechnung wird eine Normalverteilung angenommen. Diese wird für jede Messstation durch das Tagesmittel (Mittelwert) und den Mittelwert aus  $mt_{\max}$  und  $mt_{\min}$  (= Standardabweichung) gebildet.

#### 8.4 Ablauf der Berechnung – Modell

Das Berechnungsmodell (schematische Darstellung siehe Abb. 8-2) ist für die Berücksichtigung mehrerer Einzelproduktivitätsverluste ausgelegt, wobei für jeden einzelnen eine Abfrage vorangestellt wird, ob dieser in die Berechnung tatsächlich integriert werden soll, oder nicht. Das Modell baut auf die Ermittlung der normalen Bauzeit auf und greift für die Berechnungen der Produktivitätsverluste auf Eingabewerte bzw. Grunddaten zu, die auch den Ressourceneinsatz definieren. Das Ergebnis jedes Einzelproduktivitätsverlusts bildet eine Aufwandswerterhöhung, die sich auf den Grund-Gesamt-Aufwandswert bezieht. Unterschieden wird in eine reine Addition der Aufwandswerterhöhungen und eine Aggregation, bei der sich der erhöhte Aufwandswert wiederum auf die Eingabedaten bzw. auf den Ressourceneinsatz auswirkt (iterative Berechnung).

<sup>16</sup> [http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten\\_oesterreich\\_1971\\_frame1.htm](http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm). Datum des Zugriffs: 20.08.2015

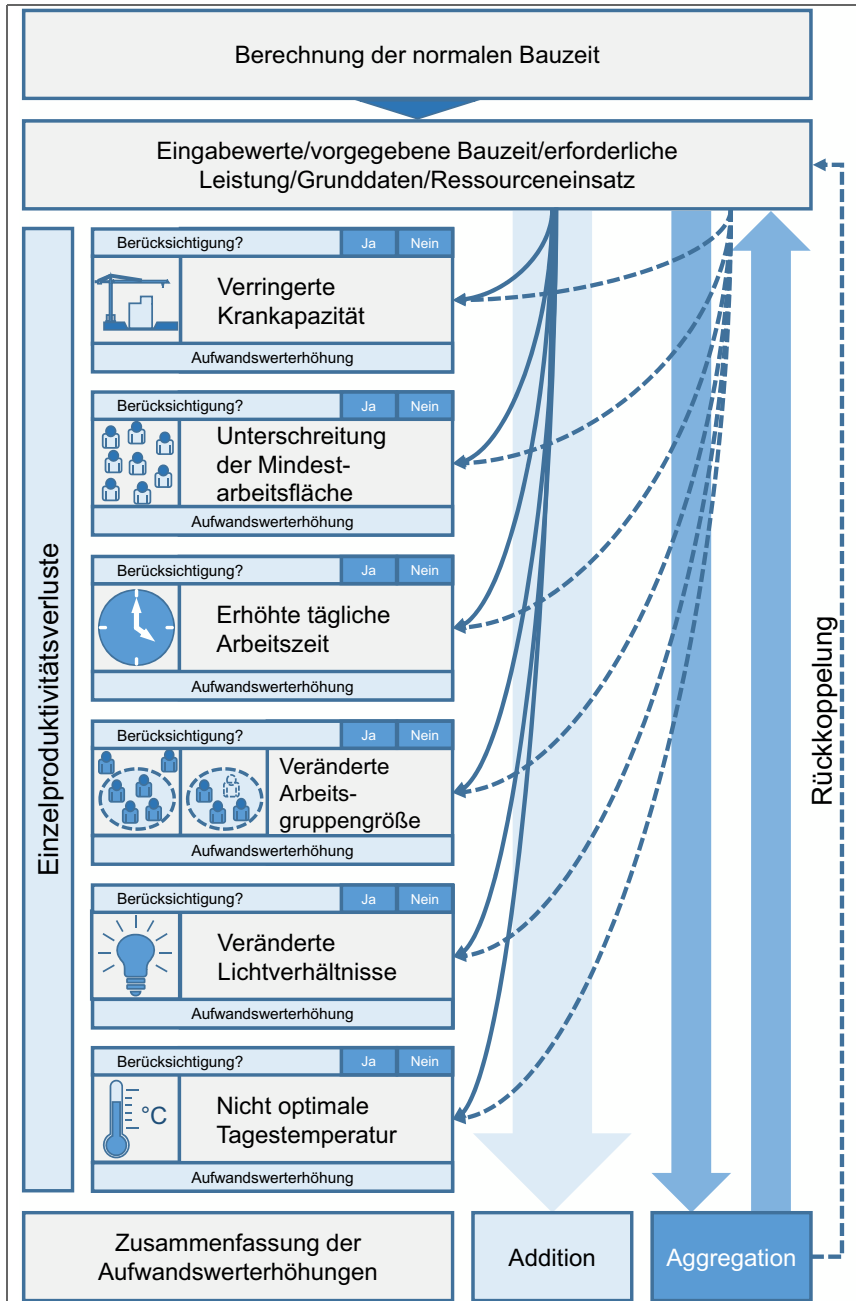


Abb. 8-2 Schematische Darstellung des Berechnungsmodells

## 8.5 Erläuterung der Berechnung – deterministische Addition

In diesem Abschnitt wird der Ablauf der Berechnung anhand einer reinen Addition der Produktivitätsverluste erläutert. Dabei werden möglichst viele Produktivitätsverluste gemeinsam berücksichtigt, um den Berechnungsablauf anhand von konkreten Zahlenwerten zu verdeutlichen. Bei der Arbeitsgruppenveränderung kann jeweils nur eine Vergrößerung oder eine Verkleinerung

im Berechnungsmodell berücksichtigt werden. Weiters wird eine Erhöhung der täglichen Arbeitszeit nicht betrachtet, da sich diese bei der reinen Addition der Aufwandswerterhöhung nicht auf das Ergebnis auswirkt. Das gemeinsame Auftreten der betrachteten Produktivitätsverluste wird anhand eines Netzdiagramms als Profil grafisch in Abb. 8-3 dargestellt.

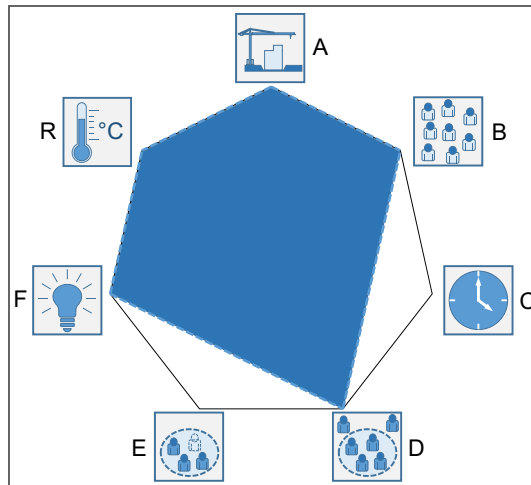


Abb. 8-3 Profil der berücksichtigten Produktivitätsverluste<sup>17</sup>

Nachdem die normale Bauzeit mit ca. 399 d ermittelt wurde, werden die Auswirkungen einer 25 %igen Bauzeitverkürzung (siehe Tab. 8-8 – Zeile 1) untersucht. Die vorgegebene, verkürzte Bauzeit beträgt damit ca. 299 d [= 398,70 d · (1 - 0,25)]. Die Betonmenge bleibt mit 38.275,00 m<sup>3</sup> (siehe Zeile 4) unverändert. Um die Stahlbetonarbeiten auch in der verkürzten Bauzeit erbringen zu können, ist eine gegenüber der normalen Bauzeit (Zeile 5) erhöhte tägliche Leistung erforderlich. Diese ist Zeile 6 mit 128,00 m<sup>3</sup>/d (= 38.275,00 m<sup>3</sup> / 299,02 d) zu entnehmen.

Die tägliche Arbeitszeit wird auch bei verkürzter Bauzeit mit 8 h/d angenommen (Zeile 7). Der Grund-Gesamt-Aufwandswert für die Stahlbetonarbeiten wird mit 6,00 Std/m<sup>3</sup> (Zeile 8) angesetzt. Der Kranproportionalitätsfaktor (Zeile 9) und der Arbeitskräftefaktor (Zeile 12) bleiben gegenüber der Berechnung für die normale Bauzeit unverändert.

Aufgrund der höheren erforderlichen Leistung müssen gegenüber der normalen Bauzeit mehr Arbeitskräfte eingesetzt werden. Die mittlere Anzahl erhöht sich dabei von 72,00 AK (Zeile 10) auf 96,00 AK (Zeile 11) und auch die maximale Anzahl an Arbeitskräften steigt auf 120,00 AK (Zeile 13) an.

Weitere Angaben in Tab. 8-8 beziehen sich auf die Kosten für den Mittellohn und die vorhandene Arbeitsfläche.<sup>18</sup> Dunkelblau hinterlegte Werte sind als Eingabewerte zu verstehen. Zeile 16 dient als Kontrollzeile, bei der aufgrund der modifizierten Anzahl an Arbeitskräften und der gewählten täglichen Arbeitszeit sowie dem Gesamt-Aufwandswert die Leistung ermittelt wird. Dieser Wert muss mit jenem in Zelle C6 übereinstimmen und ist besonders bei der Aggregation für den Berechnungsablauf wichtig. Anzumerken ist

<sup>17</sup> Der Produktivitätsverlust infolge nicht optimaler Tagestemperatur wird mit dem Buchstaben „R“ abgekürzt, da die Buchstaben „A“ bis „Q“ bereits für andere Produktivitätsverluste bei zu kurzer und/oder zu langer Bauzeit vergeben sind (siehe Abschnitt 6.6.1 – Seite 220f).

<sup>18</sup> Freie Annahme der vorhandenen Arbeitsfläche.

hierbei, dass für die Addition keine schrittweise Anpassung der Arbeitskräfteanzahl aufgrund des erhöhten Gesamt-Aufwandswerts erfolgt. Diese Rückkoppelung wird bei der Aggregation berücksichtigt.

Gegenstand	Lfd. Nr.	Eingangsgröße	Einheit	Addition
	0	A	B	C
Eingabewerte/ vorgegebene Bauzeit/ erforderliche Leistung/ Grunddaten/ Ressourceneinsatz	1	Bauzeitverkürzung	[%]	25,00
	2	Normale Bauzeit	[d]	398,70
	3	Verkürzte Bauzeit	[d]	299,02
	4	Betonmenge	[m³]	38.275,00
	5	Erforderliche Leistung – Normale Bauzeit	[m³/d]	96,00
	6	<b>Erforderliche Leistung</b>	[m³/d]	<b>128,00</b>
	7	Tägliche Arbeitszeit – tatsächlich	[h/d]	8,00
	8	<b>AW<sub>STB</sub></b>	[Std/m³]	<b>6,00</b>
	9	Kranproportionalitätsfaktor	[AK/Kran]	18,00
	10	Normale Anzahl an AK – MW	[AK]	72,00
	11	<b>Anzahl erforderliche AK – MW</b>	[AK]	<b>96,00</b>
	12	<b>Arbeitskräftefaktor – Trapezmodell</b>	[-]	<b>0,80</b>
	13	<b>Maximale Anzahl an Arbeitskräften</b>	[AK]	<b>120,00</b>
	14	Mittellohnenkosten	[€/Std]	34,00
	15	Vorhandene Arbeitsfläche	[m²]	3.000,00
	16	Tägliche Leistung	[m³/d]	128,00

Tab. 8-8 Berechnungstabelle – Eingabewerte/Grunddaten/  
Ressourceneinsatz

### 8.5.1 Verringerte Krankkapazität

Die Berücksichtigung des Einzelproduktivitätsverlusts für eine verringerte Krankkapazität wird in Tab. 8-9 gezeigt. In Zeile 17 wird zunächst abgefragt, ob dieser Produktivitätsverlust überhaupt in der Berechnung berücksichtigt werden soll. Es handelt sich dabei um eine Eingabezeile, bei der entweder die Eingabe „1“ (Ja) oder „0“ (Nein) zulässig ist. Erfolgt eine abweichende Eingabe, erscheint eine Fehlermeldung (siehe Abb. 8-4).<sup>19</sup>

PV – Krankkapazität 	17	Berücksichtigung?	(1 = Ja; 0 = Nein)	1
	18	ANZ <sub>K,VOR</sub>	[Krane]	5,00
	19	ANZ <sub>K,OPT</sub>	[Krane]	6,67
	20	KK <sub>RED</sub>	[%]	25,00
	21	<b>ΔAW<sub>ERH,KK</sub></b>	[%]	<b>17,52</b>
	22	<b>ΔAW<sub>ERH,KK</sub></b>	[Std/m³]	<b>1,05</b>

Tab. 8-9 Berechnungstabelle – Addition – Verringerte Krankkapazität

Die vorhandene (und baubetrieblich maximal sinnvolle) Anzahl der Krane ANZ<sub>K,VOR</sub> ist in Zeile 18 mit 5 Kranen angegeben. Die rechnerisch optimal Anzahl an Kranen ANZ<sub>K,OPT</sub> ist in Zeile 19 mit 6,67 Kranen (= 120 AK / 18 AK/Kran) angegeben. Diese Anzahl errechnet sich aus der Division der maximalen Arbeitskräfteanzahl (siehe Tab. 8-8 – Zeile 13) durch den festgelegten Kranproportionalitätsfaktor (siehe Tab. 8-8 – Zeile 9). Die

<sup>19</sup> Die Festlegung und Definition der Fehlermeldung erfolgt in MS Excel durch eine „Datenüberprüfung“.

Krankapazitätsreduktion  $KK_{RED}$  wird durch Anwendung der Glg. (4-1) in Zeile 20 mit 25 % ermittelt. Wird diese in Glg. (4-2) eingesetzt, ergibt sich die Aufwandswerterhöhung  $\Delta AW_{ERH, KK}$  mit 17,52 % (Zeile 21). Angewendet auf den Grund-Gesamt-Aufwandswert entspricht dies einer Aufwandswerterhöhung von 1,05 Std/m<sup>3</sup> (= 6,00 Std/m<sup>3</sup> · 17,52 % / 100 %) – siehe Zeile 22.

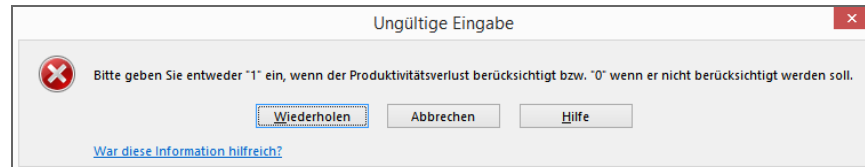


Abb. 8-4 Fehlermeldung bei falscher Eingabe

### 8.5.2 Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche

Der zweite Einzelproduktivitätsverlust der berücksichtigt wird (siehe Eingabe einer „1“ in Zeile 23 der Tab. 8-10) ist die mögliche Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche. Dazu ist zunächst die vorhandene Arbeitsfläche je Arbeitskraft  $AF_{VOR}$  [m<sup>2</sup>/AK] (Zeile 24) zu ermitteln. Diese ergibt sich aus der Division der vorhandenen Arbeitsfläche (siehe Tab. 8-8 – Zeile 15) durch die mittlere Anzahl an Arbeitskräften (siehe Tab. 8-8 – Zeile 11) mit 31,25 m<sup>2</sup>/AK (= 3.000 m<sup>2</sup> / 96,00 AK).

Die Mindestarbeitsfläche  $AF_{MIN}$  [m<sup>2</sup>/AK] wird mit 23,90 m<sup>2</sup>/AK in Zeile 25 angesetzt (siehe Tab. 8-3, Seite 285). Dies bedeutet, dass im konkreten Fall keine Arbeitsflächenreduktion  $AF_{RED}$  [%] (Zeile 26 – Berechnung nach Glg. (4-11)) vorliegt, da die vorhandene Arbeitsfläche je Arbeitskraft größer ist als die Mindestarbeitsfläche.

An diesem Einzelproduktivitätsverlust zeigt sich, dass im Berechnungsmodell die Berücksichtigung eines Produktivitätsverlusts noch nicht bedeutet, dass dieser auch tatsächlich zu einer Aufwandswerterhöhung führt. Die Grenzwerte werden dazu bei der Berechnung jedes Produktivitätsverlusts gesondert auf Über- bzw. Unterschreitung geprüft.

Für das gegenständliche Beispiel bedeutet der negative Wert der Arbeitsflächenreduktion, dass es zu keiner Aufwandswerterhöhung (die nach Glg. (4-12) berechnet worden wäre) bei der Addition der Produktivitätsverluste kommt.

PV – Mindestarbeitsfläche	PV – Mindestarbeitsfläche			
	23	Berücksichtigung?	(1 = Ja; 0 = Nein)	1
	24	$AF_{VOR}$	[m <sup>2</sup> /AK]	31,25
	25	$AF_{MIN}$	[m <sup>2</sup> /AK]	23,90
	26	$AF_{RED}$	[%]	-30,75
	27	$\Delta AW_{ERH, AF}$	[%]	0,00
	28	$\Delta AW_{ERH, AF}$	[Std/m <sup>3</sup> ]	0,00

Tab. 8-10 Berechnungstabelle – Addition – Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche

### 8.5.3 Erhöhte tägliche Arbeitszeit

Bei Termindruck kann es erforderlich werden, die tägliche Arbeitszeit zu erhöhen, sodass mehr als 8 h/d gearbeitet wird. Die dadurch entstehenden


Produktivitätsverluste bzw. die Verringerung der effektiv nutzbaren Arbeitszeit werden in Tab. 8-11 berechnet.

In Zeile 29 ist ersichtlich, dass dieser Produktivitätsverlust für die Addition nicht berücksichtigt wird. Generell, ist im Modell aber in Zeile 30 einzugeben, ob die erhöhte tägliche Arbeitszeit am Beginn der Arbeiten (Eingabe: „1“) oder am Ende der Arbeiten (Eingabe: „0“) bekannt gegeben werden.

Die nominell angesetzte tägliche Arbeitszeit entspricht dabei jener, die in Tab. 8-8, Zeile 7 eingegeben wurde. Die effektiv nutzbare tägliche Arbeitszeit wird dann anhand von Glg. (4-4) bzw. Glg. (4-5) ermittelt.

Je nachdem, ob dieser Einzelproduktivitätsverlust berücksichtigt wird oder nicht, bzw. wann die erhöhte tägliche Arbeitszeit bekannt gegeben wird, ist in Zeile 34 die entsprechende effektiv nutzbare Arbeitszeit abzulesen.

Nachdem bei der Addition die verminderte effektiv nutzbare Arbeitszeit, aufgrund fehlender Rückkoppelungen, keinen Einfluss auf das Ergebnis hat, wird dieser Produktivitätsverlust für die Addition nicht berücksichtigt.

<b>PV – Erhöhte tägliche Arbeitszeit</b> 	29	Berücksichtigung?	(1 = Ja; 0 = Nein)	0
	30	Erhöhte tägliche Arbeitszeit am Beginn der Arbeiten bekannt gegeben?	(1 = Beginn; 0 = Ende)	1
	31	Nominelle tägliche Arbeitszeit	[h/d]	8,00
	32	Nutzbare Arbeitszeit – am Beginn der Arbeit bekannt	[h/d]	8,00
	33	Nutzbare Arbeitszeit – am Ende der Arbeit bekannt	[h/d]	8,00
	34	<b>Für die tägliche Leistung nutzbare tägliche Arbeitszeit</b>	[h/d]	<b>8,00</b>

Tab. 8-11 Berechnungstabelle – Addition – Erhöhte tägliche Arbeitszeit

#### 8.5.4 Veränderte Arbeitsgruppengröße



Durch die Erhöhung der Arbeitskräfteanzahl kann es zu einer nicht optimalen Arbeitsgruppengröße mit entsprechenden Über- oder Unterschreitungen der definierten Grenzgröße kommen. Wie die mittlere optimale Arbeitsgruppengröße für Stahlbetonarbeiten beispielhaft ermittelt werden kann, wurde bereits in Abschnitt 8.3.5 (Seite 286f) gezeigt. Für das Beispiel wird angenommen, dass die Arbeitsgruppen immer mit der optimalen Arbeitsgruppengröße zusammengesetzt werden können. Die letzte Gruppe hat dann je nach Betrachtung entweder mehr, weniger oder genau so viele Arbeitskräfte wie das definierte Optimum (Tab. 8-12 – Zeile 37 bzw. 47).

Die Bezugsbasis stellt dabei die mittlere Anzahl der Arbeitskräfte (Zeile 36 und Zeile 46 bzw. siehe Tab. 8-8 – Zeile 11) dar.

Über die Eingaben in den Zeilen 35 bzw. 44 kann ausgewählt werden, ob der Einzelproduktivitätsverlust berücksichtigt wird oder nicht. Dabei gilt es zu beachten, dass nur einer der beiden Produktivitätsverluste (Arbeitsgruppenvergrößerung oder -verkleinerung) zulässig ist. Diese Regel wird in Zeile 45 auf Plausibilität überprüft. Obwohl in den Zeilen 35 und 44 eine „1“ eingetragen ist, wird der Produktivitätsverlust aus einer Arbeitsgruppenverkleinerung in der Berechnung nicht berücksichtigt, da im gezeigten Modell der Produktivitätsverlust aus einer Arbeitsgruppenvergrößerung vorrangig ermittelt wird.

Für die Vergrößerung der Arbeitsgruppen ist in Zeile 38 die Anzahl der Gruppen angegeben, die keine Produktivitätsverluste aufgrund der Gruppengröße verursachen. In Zeile 39 ist die letzte verbleibende Gruppe mit der Anzahl an beteiligten Arbeitskräften eingetragen. Für die Addition ergibt sich für dieses Beispiel auch hier eine Anzahl von 4 AK. Dies führt in weiterer Folge dazu, dass die Arbeitskräfteerhöhung  $AK_{ERH}$  (Zeile 40) und damit auch die Aufwandswerterhöhung der einen Gruppe (ermittelt nach Glg. (4-8)) null ist. Würde eine nicht optimale Arbeitsgruppengröße für die letzte Gruppe vorliegen, müsste die daraus folgende Aufwandswerterhöhung wiederum durch die Gesamtanzahl der Arbeitskräfte (mittlere Anzahl) dividiert werden, um diese rechnerisch auf alle Arbeitskräfte umzulegen (Zeile 42).

Da die Arbeitsgruppenverkleinerung nur bis -50 % definiert ist (vgl. Abschnitt 4.9.5 – Seite 102ff), wird bei einer größeren Unterschreitung davon ausgegangen, dass die verbleibende Arbeitsgruppe so zusammengesetzt wird, dass es zu einer Arbeitsgruppenvergrößerung kommt. Ob eine Arbeitsgruppenverkleinerung berücksichtigt werden kann, wird in Zeile 51 geprüft.

<b>PV – Arbeitsgruppenvergrößerung</b> 	35	Berücksichtigung?	(1 = Ja; 0 = Nein)	1
	36	Anzahl der Arbeitskräfte – Mittelwert	[Std/h]	96,00
	37	Optimale Arbeitsgruppengröße	[Std/h]	4,00
	38	Anzahl der Gruppen ohne PV	[-]	23,00
	39	PV-Gruppe – $AK_{VORH}$	[Std/h]	4,00
	40	$AK_{ERH}$	[%]	0,00
	41	$\Delta AW_{AK,ERH}$ – eine Gruppe	[%]	0,00
	42	$\Delta AW_{AK,ERH}$ – umgelegt auf alle AK	[%]	0,00
	43	$\Delta AW_{AK,ERH}$	[Std/m <sup>2</sup> ]	0,00
	<b>PV – Arbeitsgruppenverkleinerung</b> 	44	Berücksichtigung?	(1 = Ja; 0 = Nein)
45		Plausibilitätskontrolle (Arbeitsgruppenvergrößerung bereits berücksichtigt?)	(1 = plausibel; 0 = nicht plausibel)	0
46		Anzahl der Arbeitskräfte – Mittelwert	[Std/h]	96,00
47		Optimale Arbeitsgruppengröße	[Std/h]	4,00
48		Anzahl der Gruppen ohne PV	[-]	24,00
49		PV-Gruppe – $AK_{VORH}$	[Std/h]	0,00
50		$AK_{RED}$	[%]	100,00
51		Kann Arbeitsgruppenreduktion berücksichtigt werden?	(1 = Ja; 0 = Nein)	0
52		$\Delta AW_{AK,RED}$ – eine Gruppe bzw. $\Delta AW_{AK,ERH}$ – eine Gruppe wenn $AK_{RED} > 50\%$	[%]	0,00
53		$\Delta AW_{AK,RED}$ – umgelegt auf alle AK bzw. $\Delta AW_{AK,ERH}$ – eine Gruppe wenn $AK_{RED} > 50\%$	[%]	0,00
54	$\Delta AW_{AK,RED}$ bzw. $\Delta AW_{AK,ERH}$ – eine Gruppe wenn $AK_{RED} > 50\%$	[Std/m <sup>2</sup> ]	0,00	

Tab. 8-12 Berechnungstabelle – Addition –  
Veränderte Arbeitsgruppengröße



### 8.5.5 Veränderte Lichtverhältnisse

Die Berücksichtigung von veränderten Lichtverhältnissen erfolgt mit Tab. 8-13. Hier wird zunächst wieder die Abfrage durchgeführt, ob der Produktivitätsverlust überhaupt in die Berechnung integriert werden soll (Zeile 55). Danach kann mittels Drop-Down-Menü (Zeile 56) ausgewählt werden, welche Art von Lichtverhältnisse (siehe dazu auch Abschnitt 4.9.4 – Seite 101f) vorherrschen. Die verbalen Begriffe aus Zeile 56 sind direkt mit den entsprechenden einheitslosen Berechnungsparametern LV gekoppelt. Die entsprechenden Zahlenwerte werden automatisch in Zeile 57 eingetragen. Die Berechnung der Aufwandswerterhöhung erfolgt in Zeile 58 durch Einsetzen in Glg. (4-6).

Nachdem die veränderten Lichtverhältnisse nicht über die gesamten Arbeitstage zu erwarten sind, gibt es in Zeile 59 – durch die Eingabe eines Prozentwerts – die Möglichkeit, die Aufwandswerterhöhung abzumindern. Für das gegenständliche Beispiel wird angenommen, dass über 20 % der Zeit mit veränderten Lichtverhältnissen („Dämmerung“) zu rechnen ist. Die Aufwandswerterhöhung  $\Delta AW_{ERH,LV}$  ergibt sich dadurch mit 1,07 % (= 5,36 % · 20 % / 100 %) – siehe Zeile 60. Bezogen auf den Grund-Gesamt-Aufwandswert entspricht dies einer Erhöhung um 0,06 Std/m<sup>3</sup> (= 6,00 Std/m<sup>3</sup> · 1,07 % / 100 %) – siehe Zeile 61.

PV – Veränderte Lichtverhältnisse				
	55	Berücksichtigung?	(1 = Ja; 0 = Nein)	1
	56	Lichtverhältnisse	{-}	Dämmerung
	57	Berechnungsparameter LV	{-}	2,00
	58	$\Delta AW_{ERH,LV}$	{%}	5,36
	59	Anteil veränderter Lichtverhältnisse je Tag	{%}	20,00
	60	$\Delta AW_{ERH,LV}$	{%}	1,07
	61	$\Delta AW_{ERH,LV}$	{Std/m <sup>3</sup> }	0,06

Tab. 8-13 Berechnungstabelle – Addition – Veränderte Lichtverhältnisse

### 8.5.6 Nicht optimale Tagestemperatur


Zur Berücksichtigung der nicht optimalen Tagestemperatur wurden die Temperaturdaten aller Messstationen, die auf der Homepage der ZAMG<sup>20</sup> veröffentlicht sind, dem gezeigten Modell hinterlegt. Die Auswahl der jeweiligen Messstation erfolgt in Tab. 8-14 (Zeile 63) mittels Drop-Down-Menü. Am Beginn der Bezeichnung ist dabei jeweils das Kürzel des jeweiligen Bundeslands<sup>21</sup> angeführt. Mit der Auswahl der Messstation erscheint in Zeile 64 die jeweilige mittlere Tagestemperatur, mit der in weiterer Folge, durch Einsetzen in Glg. (4-3), die Aufwandswerterhöhung  $\Delta AW_{ERH,TMP}$  berechnet wird. Bei Zeile 66 handelt es sich um eine Kontrollzeile, da es vorkommen kann, dass durch das Einsetzen der mittleren Tagestemperatur in Glg. (4-3) eine negative Aufwandswerterhöhung berechnet wird.<sup>22</sup> Ist dies der Fall, wird die Aufwandswerterhöhung auf 0 % korrigiert. Umgelegt auf den Grund-Gesamt-

<sup>20</sup> [http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten\\_oesterreich\\_1971\\_frame1.htm](http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm). Datum des Zugriffs: 20.08.2015

<sup>21</sup> Wien (W); Niederösterreich (NÖ); Burgenland (B); Oberösterreich (OÖ); Steiermark (ST); Kärnten (K); Salzburg (S); Tirol (T); Vorarlberg (V)

<sup>22</sup> Dies hängt mit der Ermittlung einer polygonalen Trendlinie aus den Ergebnissen der ExpertInnenbefragung nach Hofstadler zusammen. Vgl. dazu auch den nichtlineren Kurvenverlauf in Abb. 4-33 (Seite 100).

Aufwandswert ergibt sich die Erhöhung für dieses Beispiel mit  $0,20 \text{ Std/m}^3$  ( $= 6,00 \text{ Std/m}^3 \cdot 3,39 \% / 100 \%$ ) – siehe Zeile 67.

<b>PV – Nicht optimale Tagestemperatur</b> 	62	Berücksichtigung?	(1 = Ja, 0 = Nein)	1
	63	Messstation	Kürzel- Bundesland - Messstation	OÖ-Linz-Stadt
	64	Mittlere Tagestemperatur	[°C]	9,40
	65	$\Delta\text{AW}_{\text{ERH,TMP}}$	[%]	3,39
	66	$\Delta\text{AW}_{\text{ERH,TMP}}$	[%]	<b>3,39</b>
67	$\Delta\text{AW}_{\text{ERH,TMP}}$	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>0,20</b>	

Tab. 8-14 Berechnungstabelle – Addition –  
Nicht optimale Tagestemperatur

### Zusammenfassung der Aufwandswerterhöhungen

In Tab. 8-15 erfolgt die Zusammenfassung der ermittelten Aufwandswerterhöhungen, wobei die prozentuellen Erhöhungen lediglich aufsummiert in Zeile 68 eingetragen werden. Die Aufwandswerterhöhung bezogen auf den Grund-Gesamt-Aufwandswert beträgt für die Addition  $1,32 \text{ Std/m}^3$  ( $= 6,00 \text{ Std/m}^3 \cdot 21,99 \% / 100 \%$ ) – siehe Zeile 69. Der neue Gesamt-Aufwandswert beträgt damit  $7,32 \text{ Std/m}^3$  ( $= 6,00 \text{ Std/m}^3 + 1,32 \text{ Std/m}^3$ ).

<b>Zusammenfassung der Aufwandswert- erhöhungen</b>	68	$\Delta\text{AW}_{\text{ERH}}$	[%]	<b>21,99</b>
	69	$\Delta\text{AW}_{\text{ERH}}$	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>1,32</b>
	70	$\text{AW}_{\text{STB,NEU}}$	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>7,32</b>

Tab. 8-15 Berechnungstabelle – Addition – Zusammenfassung der  
Aufwandswerterhöhungen




Die Summe der Lohnstunden kann in weiterer Folge durch die Multiplikation des neuen Gesamt-Aufwandswerts mit der Stahlbetonmenge ermittelt werden und ergibt sich mit  $280.173,00 \text{ Std}$  ( $= 7,32 \text{ Std/m}^3 \cdot 38.275,00 \text{ m}^3$ ). Durch die Einbeziehung der Mittellohnkosten in der Höhe von  $34,00 \text{ €/Std}$  ergeben sich die Lohnkosten für diese Grobbetrachtung mit  $9.525.882 \text{ €}$ .

## 8.6 Erläuterung der Berechnung – deterministische Aggregation

Bei der deterministischen Aggregation (siehe Tab. 8-16 und Tab. 8-17) werden in den einzelnen „Blöcken“ nach Abb. 8-2 grundsätzlich die gleichen Berechnungsschritte durchgeführt wie bei der Addition. Wesentlicher Unterschied ist jedoch, dass der neue Aufwandswert in Zeile 70 (am Ende der Berechnung) gleichzeitig wieder den Eingabewert in Zeile 8 (am Beginn der Berechnungstabelle) darstellt. Durch diesen „Zirkelbezug“ und das Zulassen von iterativen Berechnungen in MS Excel, lässt sich die Rückkoppelung von Aufwandswerterhöhungen auf den Ressourceneinsatz abbilden. Erhöht sich der Aufwandswert aufgrund von Produktivitätsverlusten, ist die Anzahl der Arbeitskräfte bzw. die nominelle tägliche Arbeitszeit zu erhöhen. Die Anpassung der Arbeitszeit erfolgt dabei im Berechnungsmodell nicht automatisch, sondern muss händisch angepasst werden, sofern dies gewünscht ist. Das Ergebnis für den erhöhten Gesamt-Aufwandswert stabilisiert sich mit jeder weiteren Iteration.<sup>23</sup>

Weiters ist es bei der Aggregation möglich, die erhöhte tägliche Arbeitszeit und die damit verbundene Verringerung der tatsächlich nutzbaren Arbeitszeit in die Berechnungen einfließen zu lassen. Dazu wird bei der Ermittlung der erforderlichen mittleren Anzahl an Arbeitskräften (Zeile 11) nicht die nominelle Arbeitszeit (Zeile 7 bzw. 31), sondern die tatsächlich nutzbare tägliche Arbeitszeit (Zeile 34) herangezogen.

Voraussetzung für die Aggregation (bzw. den beschriebenen Rückkopplungseffekt) ist, dass die vorgegebene Bauzeit eingehalten werden muss. Nur in einem solchen Fall muss der Ressourceneinsatz entsprechend angepasst werden.

Gegenstand	Lfd. Nr.	Eingangsgröße	Einheit	Aggregation
				C
<b>Eingabewerte/ vorgegebene Bauzeit/ erforderliche Leistung/ Grunddaten/ Ressourceneinsatz</b>	0	A	B	C
	1	Bauzeitverkürzung	[%]	25,00
	2	Normale Bauzeit	[d]	398,70
	3	Verkürzte Bauzeit	[d]	299,02
	4	Betonmenge	[m <sup>3</sup> ]	38.275,00
	5	Erforderliche Leistung – Normale Bauzeit	[m <sup>3</sup> /d]	96,00
	6	<b>Erforderliche Leistung</b>	[m <sup>3</sup> /d]	<b>128,00</b>
	7	Tägliche Arbeitszeit – tatsächlich	[h/d]	8,00
	8	<b>AW<sub>STB</sub></b>	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>9,51</b>
	9	Kranproportionalitätsfaktor	[AK/Kran]	18,00
	10	Normale Anzahl an AK – MW	[AK]	72,00
	11	<b>Anzahl erforderliche AK – MW</b>	[AK]	<b>152,11</b>
	12	<b>Arbeitskräftefaktor – Trapezmodell</b>	[-]	<b>0,80</b>
	13	<b>Maximale Anzahl an Arbeitskräften</b>	[AK]	<b>190,14</b>
	14	Mittellohnkosten	[€/Std]	34,00
	15	Vorhandene Arbeitsfläche	[m <sup>2</sup> ]	3.000,00
16	Tägliche Leistung	[m <sup>3</sup> /d]	128,00	
<b>PV – Krankkapazität</b> 	17	Berücksichtigung?	(1 = Ja, 0 = Nein)	1
	18	ANZ <sub>K,VOR</sub>	[Krane]	5,00
	19	ANZ <sub>K,OPT</sub>	[Krane]	10,56
	20	KK <sub>RED</sub>	[%]	52,67
	21	<b>ΔAW<sub>ERH,KK</sub></b>	[%]	<b>46,69</b>
	22	<b>ΔAW<sub>ERH,KK</sub></b>	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>2,80</b>
<b>PV – Mindest- arbeitsfläche</b> 	23	Berücksichtigung?	(1 = Ja, 0 = Nein)	1
	24	AF <sub>VOR</sub>	[m <sup>2</sup> /AK]	19,72
	25	AF <sub>MIN</sub>	[m <sup>2</sup> /AK]	23,90
	26	AF <sub>RED</sub>	[%]	17,48
	27	<b>ΔAW<sub>ERH,AF</sub></b>	[%]	<b>7,29</b>
	28	<b>ΔAW<sub>ERH,AF</sub></b>	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>0,44</b>
<b>PV – Erhöhte tägliche Arbeitszeit</b> 	29	Berücksichtigung?	(1 = Ja, 0 = Nein)	0
	30	Erhöhte tägliche Arbeitszeit am Beginn der Arbeiten bekannt gegeben?	(1 = Beginn; 0 = Ende)	1
	31	Nominelle tägliche Arbeitszeit	[h/d]	8,00
	32	Nutzbare Arbeitszeit – am Beginn der Arbeit bekannt	[h/d]	8,00
	33	Nutzbare Arbeitszeit – am Ende der Arbeit bekannt	[h/d]	8,00
	34	<b>Für die tägliche Leistung nutzbare tägliche Arbeitszeit</b>	[h/d]	<b>8,00</b>

Tab. 8-16 Berechnungstabelle – Aggregation – Teil 1

<sup>23</sup> Gewählt wurde in Excel eine maximale Iterationsanzahl von 1.000 und eine maximale Änderung von 0,0001.

<b>PV – Arbeitsgruppenvergrößerung</b> 	35	<b>Berücksichtigung?</b>	(1 = Ja; 0 = Nein)	<b>1</b>
	36	Anzahl der Arbeitskräfte – Mittelwert	[Std/h]	152,11
	37	<b>Optimale Arbeitsgruppengröße</b>	[Std/h]	<b>4,00</b>
	38	Anzahl der Gruppen ohne PV	[-]	37,00
	39	PV-Gruppe – $AK_{VORH}$	[Std/h]	4,11
	40	$AK_{ERH}$	[%]	2,81
	41	<b><math>\Delta AW_{AK,ERH}</math> – eine Gruppe</b>	[%]	<b>0,98</b>
	42	<b><math>\Delta AW_{AK,ERH}</math> – umgelegt auf alle AK</b>	[%]	<b>0,01</b>
	43	<b><math>\Delta AW_{AK,ERH}</math></b>	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>0,00</b>
<b>PV – Arbeitsgruppenverkleinerung</b> 	44	<b>Berücksichtigung?</b>	(1 = Ja; 0 = Nein)	<b>1</b>
	45	Plausibilitätskontrolle (Arbeitsgruppenvergrößerung bereits berücksichtigt?)	(1 = plausibel; 0 = nicht plausibel)	0
	46	Anzahl der Arbeitskräfte – Mittelwert	[Std/h]	152,11
	47	<b>Optimale Arbeitsgruppengröße</b>	[Std/h]	<b>4,00</b>
	48	Anzahl der Gruppen ohne PV	[-]	38,00
	49	PV-Gruppe – $AK_{VORH}$	[Std/h]	0,11
	50	$AK_{RED}$	[%]	97,19
	51	Kann Arbeitsgruppenreduktion berücksichtigt werden?	(1 = Ja; 0 = Nein)	0
	52	<b><math>\Delta AW_{AK,RED}</math> – eine Gruppe</b> bzw. $\Delta AW_{AK,ERH}$ – eine Gruppe wenn $AK_{RED} > 50$ %	[%]	<b>0,98</b>
	53	<b><math>\Delta AW_{AK,RED}</math> – umgelegt auf alle AK</b> bzw. $\Delta AW_{AK,ERH}$ – eine Gruppe wenn $AK_{RED} > 50$ %	[%]	<b>0,00</b>
	54	<b><math>\Delta AW_{AK,RED}</math></b> bzw. $\Delta AW_{AK,ERH}$ – eine Gruppe wenn $AK_{RED} > 50$ %	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>0,00</b>
<b>PV – Veränderte Lichtverhältnisse</b> 	55	<b>Berücksichtigung?</b>	(1 = Ja; 0 = Nein)	<b>1</b>
	56	<b>Lichtverhältnisse</b>	[-]	<b>Dämmerung</b>
	57	Berechnungsparameter LV	[-]	2,00
	58	$\Delta AW_{ERH,LV}$	[%]	5,36
	59	<b>Anteil veränderter Lichtverhältnisse je Tag</b>	[%]	<b>20,00</b>
	60	<b><math>\Delta AW_{ERH,LV}</math></b>	[%]	<b>1,07</b>
61	<b><math>\Delta AW_{ERH,LV}</math></b>	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>0,06</b>	
<b>PV – Nicht optimale Tagestemperatur</b> 	62	<b>Berücksichtigung?</b>	(1 = Ja; 0 = Nein)	<b>1</b>
	63	<b>Messstation</b>	Kürzel-Bundesland - Messstation	<b>OÖ-Linz-Stadt</b>
	64	Mittlere Tagestemperatur	[°C]	9,40
	65	$\Delta AW_{ERH,TMP}$	[%]	3,39
	66	<b><math>\Delta AW_{ERH,TMP}</math></b>	[%]	<b>3,39</b>
	67	<b><math>\Delta AW_{ERH,TMP}</math></b>	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>0,20</b>
<b>Zusammenfassung der Aufwandswert-erhöhungen</b>	68	<b><math>\Delta AW_{ERH}</math></b>	[%]	<b>58,45</b>
	69	<b><math>\Delta AW_{ERH}</math></b>	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>3,51</b>
	70	<b><math>AW_{STB,NEU}</math></b>	[Std/m <sup>3</sup> ]	<b>9,51</b>

Tab. 8-17 Berechnungstabelle – Aggregation – Teil 2

Gegenüber der reinen Addition zeigt sich – bei gleichen Inputwerten und den gleichen berücksichtigten Produktivitätsverlusten – eine deutliche Erhöhung des Gesamt-Aufwandswerts auf 9,51 Std/m<sup>3</sup> (bei der reinen Addition nur 7,32 Std/m<sup>3</sup>). Bei der Aggregation treten aufgrund der angepassten Anzahl an Arbeitskräften auch Produktivitätsverluste aufgrund der Unterschreitung








der Mindestarbeitsfläche sowie der Arbeitsgruppenvergrößerung auf. Weiters verstärkt sich der Produktivitätsverlust aus der verringerten Krankkapazität.

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 7.5 (Seite 265ff) lässt sich die aggregierte Aufwandswerterhöhung in Matrixschreibweise darstellen. Ziel ist es, die gegenseitigen Beeinflussungen der betrachteten Produktivitätsverluste aufzuzeigen und quantitativ darzustellen.

Um die einzelnen Eintragungen der Matrix berechnen zu können, wird die Aggregation zunächst immer nur mit einem möglichen Produktivitätsverlust durchgeführt. Die prozentuellen Aufwandswerterhöhungen dieser Berechnungen sind auf der Hauptdiagonalen der Matrix in Tab. 8-18 eingetragen. Da die erhöhte tägliche Arbeitszeit sowie die Arbeitsgruppenverkleinerung nicht berücksichtigt wurden, weisen die Werte in den Spalten und Zeilen C sowie E einen Wert von null auf.


Weiters nehmen die Einzelproduktivitätsverluste infolge veränderter Lichtverhältnisse und der nicht optimalen Tagestemperatur insofern eine Sonderstellung in der Matrix ein, da diese nicht von anderen Produktivitätsverlusten beeinflusst werden. Die Matrixwerte in den Spalten F und R nehmen daher – bis auf die beiden Zellen der Hauptdiagonalen (FF und RR) – den Wert null an.

Die übrigen Matrixwerte wurden jeweils in gesonderten Berechnungen dermaßen ermittelt, dass immer zwei Produktivitätsverluste im Modell berücksichtigt und die prozentuellen Aufwandswerterhöhungen abgelesen wurden. Für die Eintragung in die Matrix ist es in weiterer Folge erforderlich, immer den entsprechenden Hauptdiagonalwert von der ermittelten Aufwandswerterhöhung abzuziehen, um nicht den jeweils eigenen Effekt des Einzelproduktivitätsverlusts nochmals in die Matrix einzutragen.

		Wirkung						
								
Ursache	A	39,64	4,01	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00
	B	2,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	D	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	F	0,77	0,00	0,00	0,13	0,00	1,07	0,00
	R	2,34	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00	3,39


Tab. 8-18 Matrixschreibweise der aggregierten Aufwandswerterhöhung

Beispielhaft wird der Zusammenhang zwischen der verringerten Krankkapazität und der nicht optimalen Tagestemperatur näher erläutert. Werden nur diese beiden Produktivitätsverluste im Zuge der Aggregation berücksichtigt, ergibt sich für die Aufwandswerterhöhung infolge der verringerten Krankkapazität ein Prozentsatz von 41,98 % (Tab. 8-19 – Zeile 21). Dieser wird um den Hauptdiagonalwert in der Zelle AA (Tab. 8-18) verringert und stellt den Matrixeintrag der Zelle RA der Tab. 8-18 dar (2,34 % = 41,98 % - 39,64 %). Es handelt sich dabei um die zusätzliche Aufwandswerterhöhung der verringerten Krankkapazität (Wirkung), die sich durch die nicht optimale Tagestemperatur (Ursache) ergibt.

<b>PV – Krankkapazität</b> 	17	Berücksichtigung?	(1 = Ja; 0 = Nein)	1
	18	ANZ <sub>K,VOR</sub>	[Krane]	5,00
	19	ANZ <sub>K,OPT</sub>	[Krane]	9,69
	20	KK <sub>RED</sub>	[%]	48,41
	21	$\Delta AW_{ERH, KK}$	[%]	<b>41,98</b>
	22	$\Delta AW_{ERH, KK}$	[Std/m <sup>2</sup> ]	<b>2,52</b>

Tab. 8-19 Berechnungstabelle – Aggregation – Verringerte Krankkapazität

Für den Einzelproduktivitätsverlust der nicht optimalen Tagestemperatur beträgt die Aufwandswerterhöhung für diese Kombination 3,39 % (siehe Tab. 8-20 – Zeile 66). Verringert um den Hauptdiagonalwert in Zelle RR ergibt sich die Aufwandswerterhöhung der nicht optimalen Tagestemperatur (Wirkung) infolge der verringerten Krankkapazität (Ursache) mit null. Die entsprechende Eintragung erfolgt in Zelle AR der Tab. 8-18.

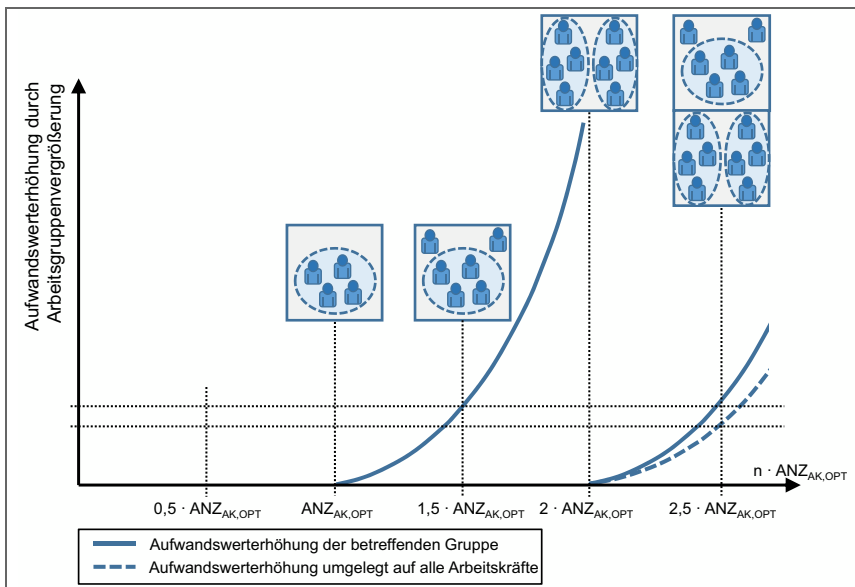
<b>PV – Nicht optimale Tagestemperatur</b> 	62	Berücksichtigung?	(1 = Ja; 0 = Nein)	1
	63	Messstation	Kürzel-Bundesland - Messstation	OÖ-Linz-Stadt
	64	Mittlere Tagestemperatur	[°C]	9,40
	65	$\Delta AW_{ERH, TMP}$	[%]	3,39
	66	$\Delta AW_{ERH, TMP}$	[%]	<b>3,39</b>
	67	$\Delta AW_{ERH, TMP}$	[Std/m <sup>2</sup> ]	<b>0,20</b>

Tab. 8-20 Berechnungstabelle – Aggregation – Nicht optimale Tagestemperatur

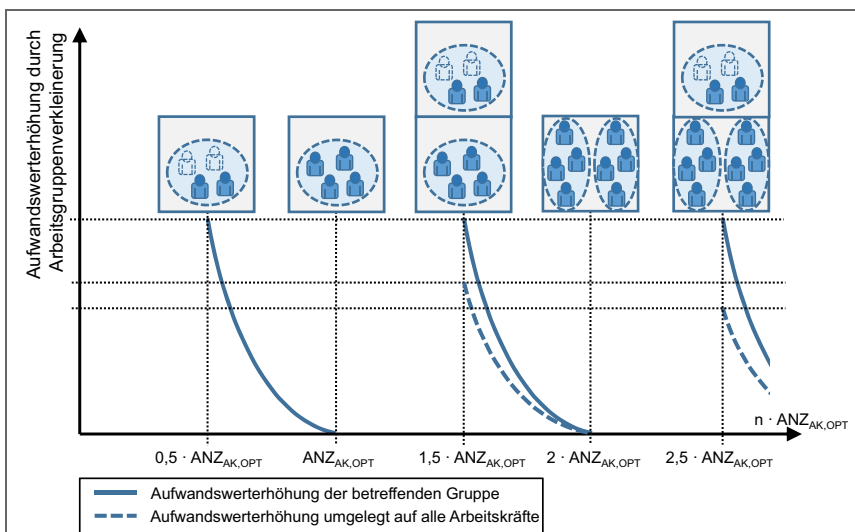
Entsprechend der gezeigten Systematik können in weiterer Folge alle Matrixwerte der Tab. 8-18 berechnet werden. Es zeigt sich, dass die verringerte Krankkapazität den größten Einfluss auf die Gesamt-Aufwandswerterhöhung ausübt und auch von allen berücksichtigten Produktivitätsverlusten zusätzlich erhöht wird (siehe Spalte A). Der Einsatz eines zusätzlichen Krans würde die Intensität der auftretenden Produktivitätsverluste und damit die Aufwandswerterhöhung insgesamt deutlich abmindern. Weiters wäre es auch möglich, die tägliche Arbeitszeit zu erhöhen und damit die Anzahl der zusätzlich erforderlichen Arbeitskräfte entsprechend zu minimieren. Im Vergleich mit der reinen Addition treten durch die Rückkoppelungen der Aggregation auch Aufwandswerterhöhungen aufgrund der Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche und der Arbeitsgruppenvergrößerung auf.

Bei genauerer Betrachtung der Matrix in Tab. 8-18 fällt auf, dass sich die Summe der prozentuellen Aufwandswerterhöhungen (= 54,94 %) von jenem

Wert in Tab. 8-17 – Zeile 68 (= 58,45 %) unterscheidet. Dies wird damit begründet, dass im gezeigten Beispiel Produktivitätsverluste aus einer veränderten Arbeitsgruppengröße mitberücksichtigt wurden und hier die Aufwandswerterhöhung jeweils „intervallweise“ erfolgt. D.h. mit insgesamt steigender Anzahl an Arbeitskräften wird immer wieder ein Vielfaches der optimalen Arbeitsgruppengröße erreicht.



**Abb. 8-5** Aufwandswerterhöhung in Folge der Arbeitsgruppenvergrößerung – schematische Darstellung



**Abb. 8-6** Aufwandswerterhöhung in Folge der Arbeitsgruppenverkleinerung – schematische Darstellung

Abb. 8-5 und Abb. 8-6 zeigen schematisch die Verläufe der Aufwandswerterhöhungen in Abhängigkeit der Anzahl an Arbeitskräften bzw. des Vielfachen der optimalen Arbeitsgruppengröße ANZ<sub>AK,OPT</sub>. Dabei weist die Aufwandswerterhöhung der betroffenen Gruppe immer intervallweise den gleichen

Verlauf auf. Wird diese Aufwandswerterhöhung jedoch auf die gesamte Anzahl an Arbeitskräften umgelegt, sinkt diese, je mehr Arbeitskräfte insgesamt eingesetzt werden (strichlierte Kurven in Abb. 8-5 und Abb. 8-6).

Da bei der Ermittlung der Matrixwerte (siehe Tab. 8-18) immer andere Kombinationen betrachtet werden und je nach Betrachtung eine andere Anzahl an Arbeitskräften für die Erreichung der erforderlichen Leistung notwendig ist, kommt es auch zu unterschiedlichen Aufwandswerterhöhungen infolge der veränderten Arbeitsgruppengröße. In dieser Problematik liegt die Ursache für die Differenz zwischen der prozentuellen Aufwandswerterhöhung der Aggregation (= 58,45 %) und jener der Summe der Matrixwerte (= 54,94 %) begründet.

Sofern die veränderte Arbeitsgruppengröße im Zuge der Aggregation nicht berücksichtigt wird, führen die Matrixwerte, ermittelt nach der gezeigten Systematik, zu der gleichen Aufwandswerterhöhung wie aus der Berechnung entsprechend der Tab. 8-16 und Tab. 8-17.

## 8.7 Probabilistische Addition

Bei deterministischen Berechnungen ist es nicht möglich, Unsicherheiten systematisch einfließen zu lassen und aus den Ergebnissen können keine Aussagen über Eintrittswahrscheinlichkeiten getroffen werden. In einem nächsten Schritt werden für das gezeigte Berechnungsbeispiel Verteilungen für die Eingabewerte angesetzt und eine probabilistische Addition der Produktivitätsverluste durchgeführt.

### 8.7.1 Eingabewerte

Vereinfacht werden für spezifische Parameter Dreiecksverteilungen – die jeweils durch einen minimalen, einen erwarteten und einen maximalen Wert definiert sind – angesetzt. Die entsprechenden Eingabewerte sind Tab. 8-21 zu entnehmen. Für den Grund-Gesamt-Aufwandswert wird jene Verteilung herangezogen, die in Abschnitt 6.6.5 (Seite 243ff) für die korrelierten Eingabeparameter ermittelt wurde.

Lfd. Nr.	Gegenstand	MIN	ERW	MAX	Einheit
0	A	B	C	D	E
1	Grund-Gesamt-Aufwandswert	siehe Abschnitt 6.6.5			
2	Tägliche Arbeitszeit	7,50	8,00	9,00	h/d
3	Betonmenge	30.620,00	38.275,00	45.930,00	m <sup>3</sup>
4	Anzahl der Krane (max. baubetrieblich möglich)	4,00	5,00	6,00	Krane
5	Maximaler Kran-Proportionalitätsfaktor	18,00	20,00	20,00	AK/Kran
6	Unterschreitung der Maximalwerte	10,00	10,00	10,00	%
7	Arbeitskräfteverhältnis	0,75	0,80	0,85	-
8	Mittellohnkosten	32,00	34,00	40,00	€/Std
9	Vorhandene Arbeitsfläche	2.500,00	3.000,00	35.000,00	m <sup>2</sup>

Tab. 8-21 Eingabewerte für die probabilistischen Berechnungen – Dreiecksverteilungen



Für die Temperaturdaten werden je Messstation Normalverteilungen angesetzt, wobei die mittlere Tagestemperatur den Mittelwert der Verteilung darstellt. Weiters sind die Normalverteilungen durch die Standardabweichung definiert, die aus dem Mittel aus  $mt_{\min}$  und  $mt_{\max}$  gebildet wird.

Die Berechnungsvorschriften für die Simulation sind die gleichen, wie bei der deterministischen Betrachtung. Es werden dabei die gleichen Produktivitätsverluste berücksichtigt. Insgesamt werden 50.000 Berechnungsdurchläufe (wiederholende Iterationen) mit dem Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren durchgeführt und der „seed“ wurde mit 1 festgelegt.

### 8.7.2 Ergebnisse und Interpretation

Für die Addition werden die einzelnen Aufwandswerterhöhungen ohne die Berücksichtigung von Rückkoppelungen zusammengezählt und auf den Grund-Gesamt-Aufandswert bezogen. Wie bereits gezeigt wurde, ist die verringerte Krankkapazität im gegenständlichen Beispiel als bestimmender Produktivitätsverlust hervorzuheben. Die Summe der prozentuellen Aufwandswerterhöhungen ist in Abb. 8-7 als Histogramm dargestellt.

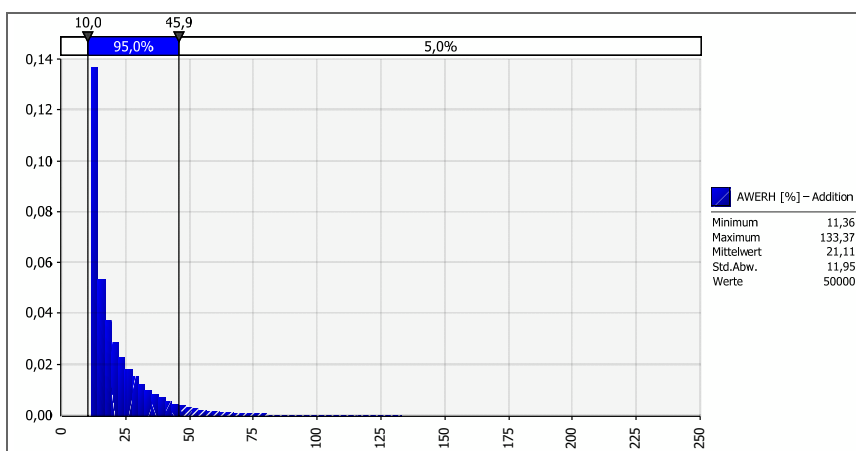
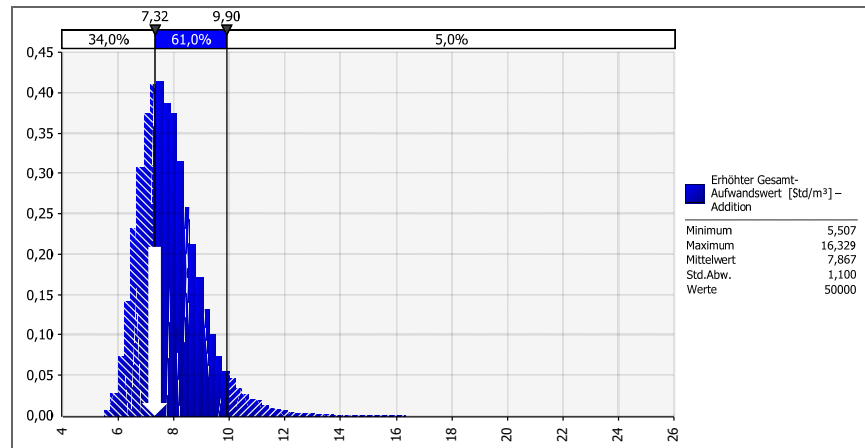


Abb. 8-7 Prozentuelle Aufwandswerterhöhung – Addition

Das Histogramm der prozentuellen Aufwandswerterhöhung weist einen starken rechtsschiefen Verlauf auf, der mit den gewählten Verteilungen der Eingabeparameter begründet werden kann.<sup>24</sup> Durch die Streuung der Inputs ergeben sich in der Simulation Szenarien, die zu großen Aufwandswerterhöhungen (bis über 130 %) führen.

Das Histogramm der prozentuellen Aufwandswerterhöhung wird in weiterer Folge auf das Histogramm des Grund-Gesamt-Aufandswerts angewendet und damit das Histogramm für den neuen Gesamt-Aufandswert der Stahlbetonarbeiten nach der Berücksichtigung der Summe der Produktivitätsverluste ermittelt (siehe Abb. 8-8). Zusätzlich ist der deterministisch ermittelte Wert (= 7,32 Std/m<sup>3</sup>) als Pfeil in das Histogramm eingetragen.

<sup>24</sup> Für die Temperaturdaten wurden beispielsweise Normalverteilungen mit offenen Enden angenommen. Hier könnten zur Optimierung der Berechnung entweder geschlossene Verteilungen der Eingabeparameter oder eine Beschränkung der prozentuellen Aufwandswerterhöhung ab einer bestimmten Temperaturgrenze angedacht werden.



**Abb. 8-8** Neuer Gesamt-Aufwandswert – Addition – Vergleich deterministischer und probabilistischer Ergebnisse

Der Vergleich der Ergebnisse aus der deterministischen und der probabilistischen Addition zeigt, dass mit dem deterministischen Wert als Basis für weitere Entscheidungen (bzw. für die Kalkulation) ein Risiko von ca. 69 % eingegangen worden wäre (siehe Abb. 8-8 – Gleitbegrenzer am oberen Rand des Diagramms). Die Chance, einen niedrigeren Aufwandswert zu erzielen, wäre bei ca. 34 % gelegen. Aus der rein deterministischen Betrachtung kann keinerlei Information zu Über- oder Unterschreitungswahrscheinlichkeiten einzelner Werte erhoben werden.

Weiters ist aus dem Histogramm in Abb. 8-8 abzulesen, dass der maximale Aufwandswert – bedingt durch die Addition der Aufwandswerterhöhungen der Einzelproduktivitätsverluste – bis auf ca. 16,0 Std/m<sup>3</sup> ansteigen kann. Dies stellt im dargestellten Histogramm zwar einen unwahrscheinlichen Fall dar, kann sich aber beim Zusammentreffen vieler nachteiliger Effekte durchaus realisieren.

## 8.8 Probabilistische Aggregation

In diesem Abschnitt wird auf die probabilistische Aggregation der insgesamt fünf betrachteten Produktivitätsverluste eingegangen und mit den Ergebnissen der deterministischen Berechnungen sowie der probabilistischen Addition verglichen.

### 8.8.1 Eingabewerte

Die Eingabewerte der probabilistischen Aggregation bleiben gegenüber der probabilistischen Addition unverändert. Einziger Unterschied ist wiederum, dass die gegenseitigen Beeinflussungen und Aufschaukelungen der Produktivitätsverluste durch stufenweise Iteration mitberücksichtigt werden.

## 8.8.2 Ergebnisse und Interpretation

Bei der probabilistischen Aggregation ist tendenziell mit einer größeren Aufwandswerterhöhung als bei der reinen Addition zu rechnen, da sich die integrierten Rückkoppelungen zusätzlich erhöhend auf den Gesamtaufwandswert auswirken. Die prozentuelle Aufwandswerterhöhung der probabilistischen Aggregation ist Abb. 8-9 zu entnehmen. Die minimale Erhöhung aus der Simulation beträgt bei fünf betrachteten Produktivitätsverlusten und bei einer Bauzeitverkürzung von 25 % für dieses Beispiel ca. 30 %. Die Bandbreite der prozentuellen Erhöhung reicht bis ca. 230 %.

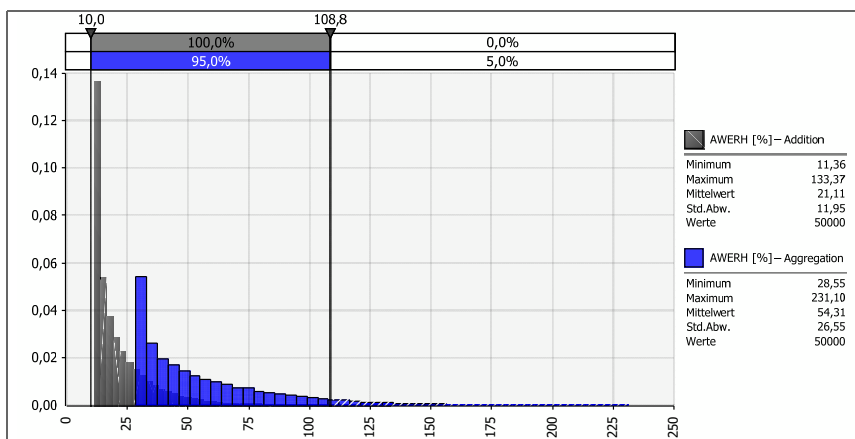


Abb. 8-9 Prozentuelle Aufwandswerterhöhung – Vergleich probabilistischer Addition und Aggregation

In Abb. 8-10 sind die Ergebnisse der deterministischen und probabilistischen Berechnungen des neuen Gesamt-Aufwandswerts sowohl für die Addition als auch für die Aggregation der betrachteten Produktivitätsverluste dargestellt. Die beiden deterministischen Werte (als Pfeile dargestellt) liefern, für sich allein betrachtet, keine Informationen über die Über-/Unterschreitungswahrscheinlichkeiten bzw. das Chancen-Risiko-Potential, das mit der Wahl dieser Zahlenwerte verbunden ist.

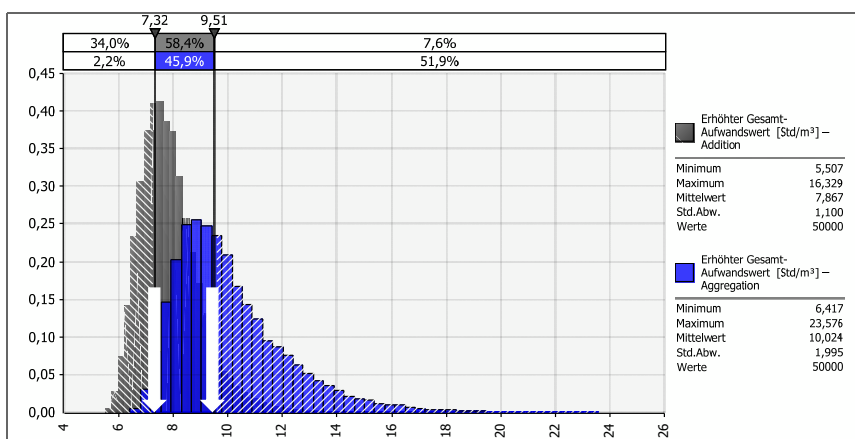


Abb. 8-10 Neuer Gesamt-Aufwandswert – Vergleich deterministischer und probabilistischer Ergebnisse – Addition und Aggregation

Erst durch die Darstellung der Ergebnisse in Form von Bandbreiten bzw. als Histogramme können die deterministischen Werte überhaupt bewertet und hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit beurteilt werden. Es zeigt sich sowohl für die Addition als auch für die Aggregation, dass die für dieses Beispiel ermittelten deterministischen Werte jeweils im unteren Bereich der jeweiligen Histogramme liegen. Damit ist die Überschreitungswahrscheinlichkeit jeweils größer als 50 % und es überwiegt damit das Risikopotential.<sup>25</sup>

Verglichen mit dem deterministischen Gesamt-Aufwandswert der Aggregation (= 9,51 Std/m<sup>3</sup>) zeigt sich in Abb. 8-10, dass ca. 48 % (= 2,2 % + 45,9 %) der Fälle unter diesem Wert liegen. Wird dieser deterministische Wert für weitere Betrachtungen herangezogen, überwiegt das Risikopotential gegenüber einer realisierbaren Chance.

Das Risikopotential wird damit bei der reinen Addition deutlich unterschätzt. Ein Aufwandswert von z.B. 8 Std/m<sup>3</sup> weist für die Addition ein Chancen-Risiko-Verhältnis von 61 % (Chance) zu 39 % (Risiko) auf. Für die Aggregation dreht sich dieses Verhältnis bei gleichem deterministischen Wert um (Chance: ca. 11 %; Risiko: ca. 89 %).

Es ist damit insgesamt zu erkennen, dass bei der reinen Addition sowohl die Bandbreite der möglichen Ergebnisse als auch die Wahrscheinlichkeit höherer Gesamt-Aufwandswerte tendenziell unterschätzt wird.

## 8.9 Aufwandswerterhöhungen unterschiedlicher Produktivitätsverlustprofile

Die in den vorangegangenen Abschnitten betrachtete Kombination von bis zu fünf Produktivitätsverlusten entspricht nicht der häufigsten Nennung der befragten ExpertInnen. Diese geben an, dass für eine zu kurze Bauzeit im Durchschnitt zwei bis drei Produktivitätsverluste gemeinsam auftreten (siehe Abschnitt 6.6.2 – Seite 228ff). Daher werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse der deterministischen und probabilistischen Berechnungen der Addition und Aggregation für die häufigsten 2er und 3er Kombinationen, die mit dem gezeigten Berechnungsmodell abgebildet werden können, einander gegenübergestellt.

### 8.9.1 Kombination 1 – AD

Bei der Kombination 1 wird das gleichzeitige Auftreten einer verminderten Krankkapazität (A) und einer Überschreitung der Arbeitsgruppengröße (D) berücksichtigt (siehe Produktivitätsverlustprofil in Abb. 8-11). Die Eingabewerte bleiben gegenüber den vorangegangenen Berechnungen unverändert. Die Berücksichtigung der beiden angeführten Produktivitätsverluste erfolgt durch Eingabe des Werts „1“ in die entsprechenden Zeilen (17 und 35) des Berechnungsmodells.

<sup>25</sup> Die Überschreitungswahrscheinlichkeit des deterministischen Werts der Addition (= 7,32 Std/m<sup>3</sup>) beträgt ca. 66 %. Jene des deterministischen Werts der Aggregation (= 9,51 Std/m<sup>3</sup>) beträgt ca. 52 %.

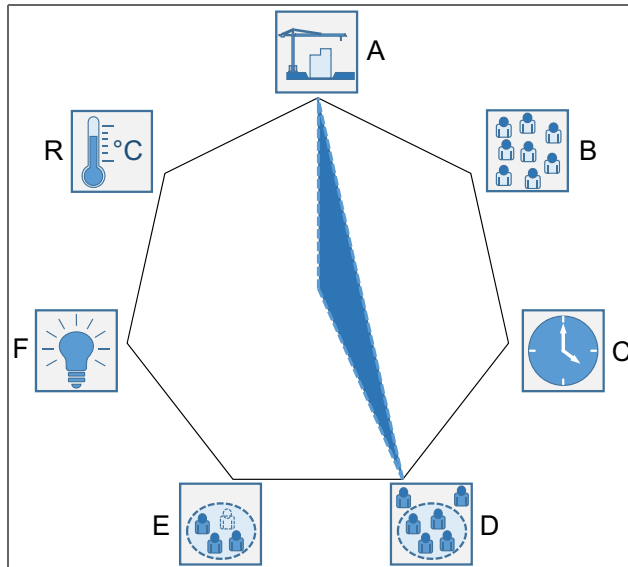


Abb. 8-11 Profil der berücksichtigten Produktivitätsverluste – Kombination 1 – AD

In Abb. 8-12 sind die beiden deterministischen Gesamt-Aufwandswerte der Addition (= 7,05 Std/m<sup>3</sup>) und der Aggregation (= 8,40 Std/m<sup>3</sup>) für diese Kombination als Pfeile eingezeichnet. Weiters sind im Hintergrund die beiden Histogramme der probabilistischen Addition (grau) und der probabilistischen Aggregation (blau) dargestellt. Es zeigt sich, dass die Bandbreite der Produktivitätsverluste gegenüber den Berechnungen mit fünf Produktivitätsverlusten deutlich abgenommen hat. Doch auch für diese Kombination ist der Gesamtaufwandswerte aus der Aggregation höher einzuschätzen als bei der Addition.

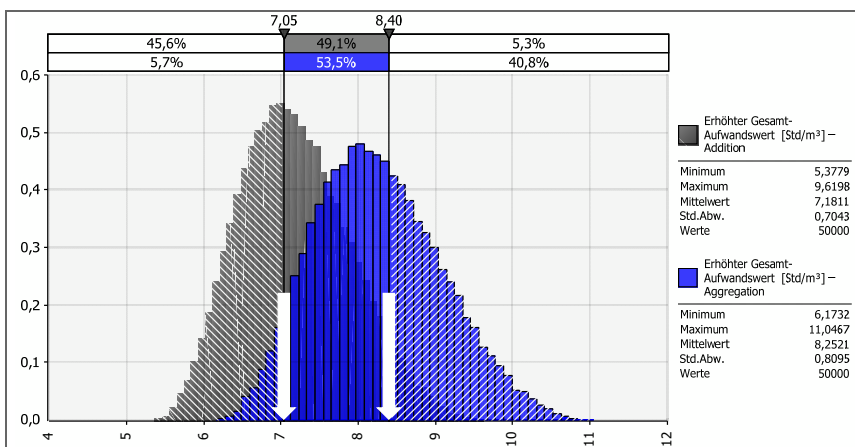


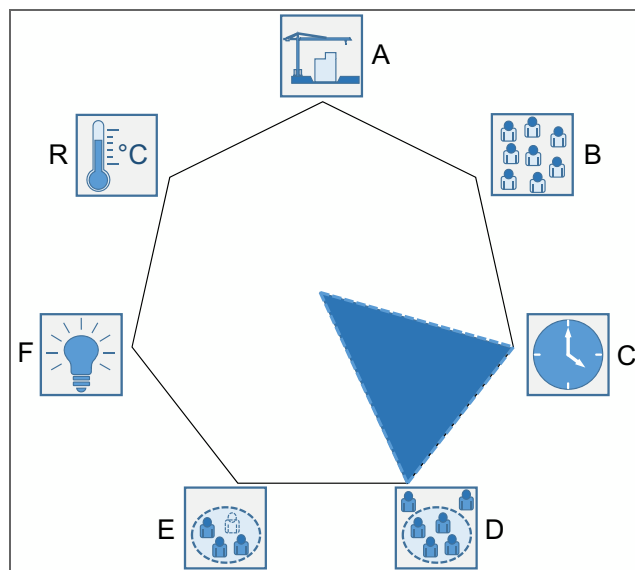
Abb. 8-12 Kombination 1 – AD – verringerte Krankkapazität und Überschreitung der Arbeitsgruppengröße – Vergleich deterministischer und probabilistischer Ergebnisse – Addition und Aggregation

Der deterministische Wert der Addition weist auf Basis des linken Histogramms eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von ca. 46 % auf. Beim

rechten Histogramm beläuft sich diese auf nur ca. 6 %. Das bedeutet, dass bei der reinen Addition der Produktivitätsverluste hohe Aufwandswerte tendenziell unterschätzt und die Wahrscheinlichkeit niedriger Aufwandswerte tendenziell überschätzt wird.

### 8.9.2 Kombination 2 – CD

Bei der Kombination 2 wird das gleichzeitige Auftreten einer erhöhten täglichen Arbeitszeit (C) und einer Überschreitung der Arbeitsgruppengröße (D) berücksichtigt (siehe Produktivitätsverlustprofil in Abb. 8-13). Die Eingabewerte bleiben gegenüber den vorangegangenen Berechnungen unverändert. Die Berücksichtigung der beiden angeführten Produktivitätsverluste erfolgt durch Eingabe des Werts „1“ in die entsprechenden Zeilen (29 und 35) des Berechnungsmodells.

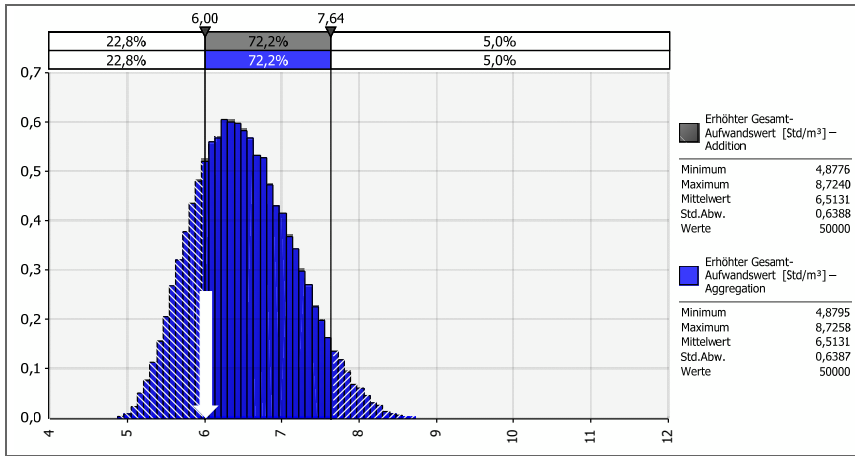


**Abb. 8-13** Profil der berücksichtigten Produktivitätsverluste – Kombination 2 – CD

Bei den deterministischen Berechnungen hat für dieses Beispiel der Produktivitätsverlust der erhöhten täglichen Arbeitszeit keinen Einfluss, da diese mit 8,00 h/d angesetzt wurde.

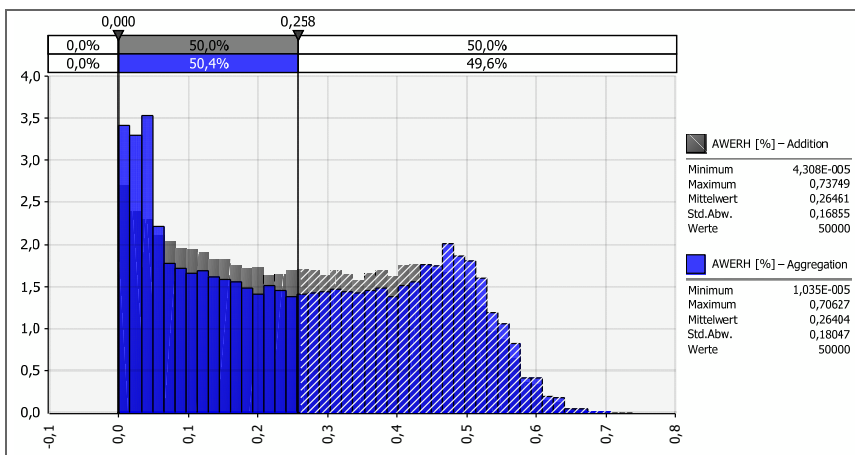
Auch für die probabilistische Addition hat der Produktivitätsverlust der erhöhten täglichen Arbeitszeit keinen Einfluss, da diese (wie in Abschnitt 8.5 erläutert) nur durch die Rückkoppelung aus der Berechnung der effektiv nutzbaren Arbeitszeit berücksichtigt werden kann. In den Ergebnissen der Addition ist daher nur die Überschreitung der Arbeitsgruppengröße integriert.

In den probabilistischen Berechnungen wurde die tägliche Arbeitszeit als Dreiecksverteilung mit den Werten 7,50 h/d; 8,00 h/d und 9,00 h/d gewählt. Die Effekte, die durch eine erhöhte tägliche Arbeitszeit auftreten, werden daher nur in wenigen Einzelergebnissen der Monte-Carlo-Simulation bei der Aggregation schlagend. Die beiden Histogramme der Addition und der Aggregation sind daher für diese Kombination der Produktivitätsverluste im gezeigten Beispiel nahezu deckungsgleich (siehe Abb. 8-14).



**Abb. 8-14** Kombination 2 – CD – erhöhte tägliche Arbeitszeit und Überschreitung der Arbeitsgruppengröße – Vergleich deterministischer und probabilistischer Ergebnisse – Addition und Aggregation

Die Bandbreite des erhöhten Gesamt-Aufwandswerts ist gegenüber den Ergebnissen der Kombination 1 (AD) deutlich geringer und weicht auch nur geringfügig von der ursprünglichen Eingabe für den Grund-Gesamt-Aufwandswert ab. Dies wird damit begründet, dass der Produktivitätsverlust für eine Überschreitung der Arbeitsgruppengröße im Modell nur auf eine Gruppe bezogen und dann auf alle Arbeitskräfte umgelegt wird. Der Erhöhungsprozentsatz für den Gesamt-Aufwandswert nimmt dementsprechend niedrige Werte an (siehe Abb. 8-15).



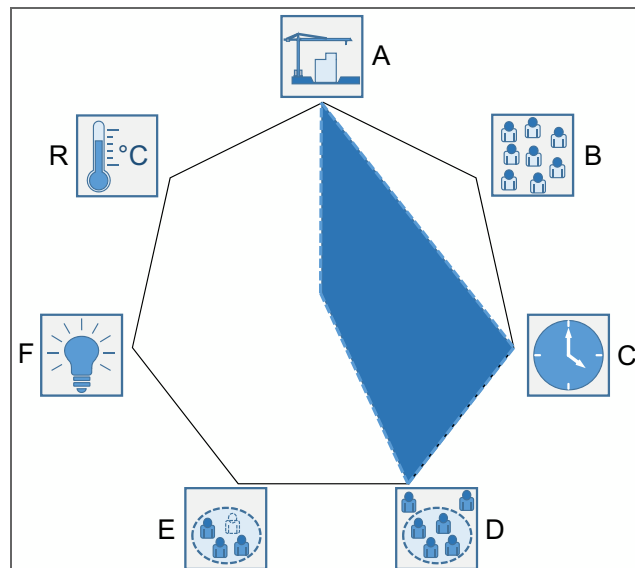
**Abb. 8-15** Kombination 2 – CD – erhöhte tägliche Arbeitszeit und Überschreitung der Arbeitsgruppengröße – Vergleich der prozentuellen Aufwandswerterhöhung – Addition und Aggregation

Interessant beim Vergleich der Histogramme in Abb. 8-15 ist, dass bei der Aggregation die Wahrscheinlichkeit für Aufwandswerterhöhungen nahe 0 % höher ist, als bei der Addition. Außerdem ist die maximale Aufwandswerterhöhung bei der Addition (nach 50.000 Iterationen) höher als bei der Aggregation. Dies ist einerseits mit dem Charakter probabilistischer Berechnungen

– die mit Zufallszahlen arbeiten – begründet, andererseits können sich bei gleichen Inputs im Zuge der Aggregation mit der Anpassung der Anzahl an Arbeitskräften günstigere Gruppengrößen ergeben als bei der reinen Addition. Es zeigt sich damit, dass es durch die Aggregation von Produktivitätsverlusten in bestimmten Fällen auch zu einer Verringerung des Gesamtproduktivitätsverlusts kommen kann.

### 8.9.3 Kombination 3 – ACD

Bei der Kombination 3 wird das gleichzeitige Auftreten einer verringerten Krankkapazität (A), einer erhöhten täglichen Arbeitszeit (C) und einer Überschreitung der Arbeitsgruppengröße (D) berücksichtigt (siehe Produktivitätsverlustprofil in Abb. 8-16). Die Eingabewerte bleiben gegenüber den vorangegangenen Berechnungen unverändert. Die Berücksichtigung der drei angeführten Produktivitätsverluste erfolgt durch Eingabe des Werts „1“ in die entsprechenden Zeilen (17, 29 und 35) des Berechnungsmodells.



**Abb. 8-16** Profil der berücksichtigten Produktivitätsverluste – Kombination 3 – ACD

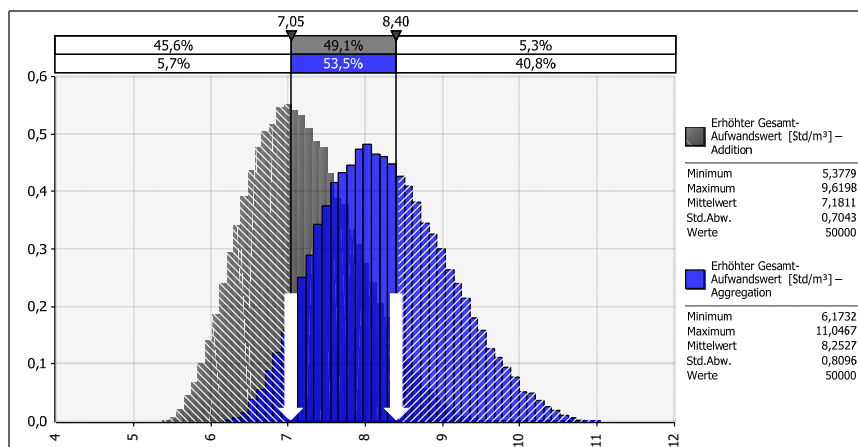
Der Produktivitätsverlust der erhöhten täglichen Arbeitszeit hat – wie bereits bei Kombination 2 ausgeführt – sowohl bei den deterministischen Berechnungen als auch bei der probabilistischen Addition keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Das Histogramm der probabilistischen Addition entspricht daher jenem der Kombination 1 (siehe Abb. 8-12 – linkes Histogramm).

Die Effekte, die durch eine erhöhte tägliche Arbeitszeit auftreten, führen daher nur in wenigen Einzelergebnissen der Monte-Carlo-Simulation bei der aggregierten probabilistischen Betrachtung zu zusätzlichen Produktivitätsverlusten.

Wie aus Abb. 8-17 ersichtlich wird, sind die deterministischen Werte der Addition (= 7,05 Std/m<sup>3</sup>) und der Aggregation (= 8,40 Std/m<sup>3</sup>) gegenüber der Kombination 1 unverändert. Lediglich das Histogramm der Aggregation verändert sich durch die zusätzliche Berücksichtigung der erhöhten täglichen



Arbeitszeit in vernachlässigbarem Ausmaß<sup>26</sup> gegenüber Kombination 1. Der Einfluss dieses zusätzlichen Produktivitätsverlusts ist für dieses Beispiel und die gewählten Eingabewerte daher von untergeordneter Bedeutung.



**Abb. 8-17** Kombination 3 – ACD – verringerte Krankkapazität, erhöhte tägliche Arbeitszeit und Überschreitung der Arbeitsgruppengröße – Vergleich deterministischer und probabilistischer Ergebnisse – Addition und Aggregation

Für die Auswahl von Gegensteuerungsmaßnahmen kann jedoch durch die erhöhte tägliche Arbeitszeit die Vergrößerung des Gesamt-Aufwandswerts in Folge von Produktivitätsverlusten und in weiterer Folge der Kosten reduziert werden. Hierbei sind allerdings die Mehrkosten, die sich aus Zuschlägen für Überstunden ergeben, in den Maßnahmenvergleich für Gegensteuerungsmaßnahmen einzubeziehen. Unter Umständen kann – sofern baubetrieblich sinnvoll – die Installation eines zusätzlichen Krans günstiger als die Erhöhung der täglichen Arbeitszeit sein.

Zur Erreichung der erforderlichen mittleren täglichen Leistung müssen bei erhöhter täglicher Arbeitszeit weniger (oder u.U. keine) zusätzliche(n) Arbeitskräfte eingesetzt werden und es kommt insgesamt zu geringeren Produktivitätsverlusten z.B. durch eine verringerte Krankkapazität, da der Bauablauf je Tag zeitlich entzerrt wird.

#### 8.9.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse

In Abb. 8-18 sind die Ergebnisse der deterministischen und probabilistischen Additionen und Aggregationen für die betrachteten Kombinationen der Produktivitätsverluste einander gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass für Kombination 1 und Kombination 3 die gleichen deterministischen Werte ermittelt werden konnten und auch die Histogramme der beiden Kombinationen für dieses Beispiel im Wesentlichen deckungsgleich sind. Die Gründe dafür wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert.

<sup>26</sup> Geringfügige Änderung des Mittelwerts und der Standardabweichung.

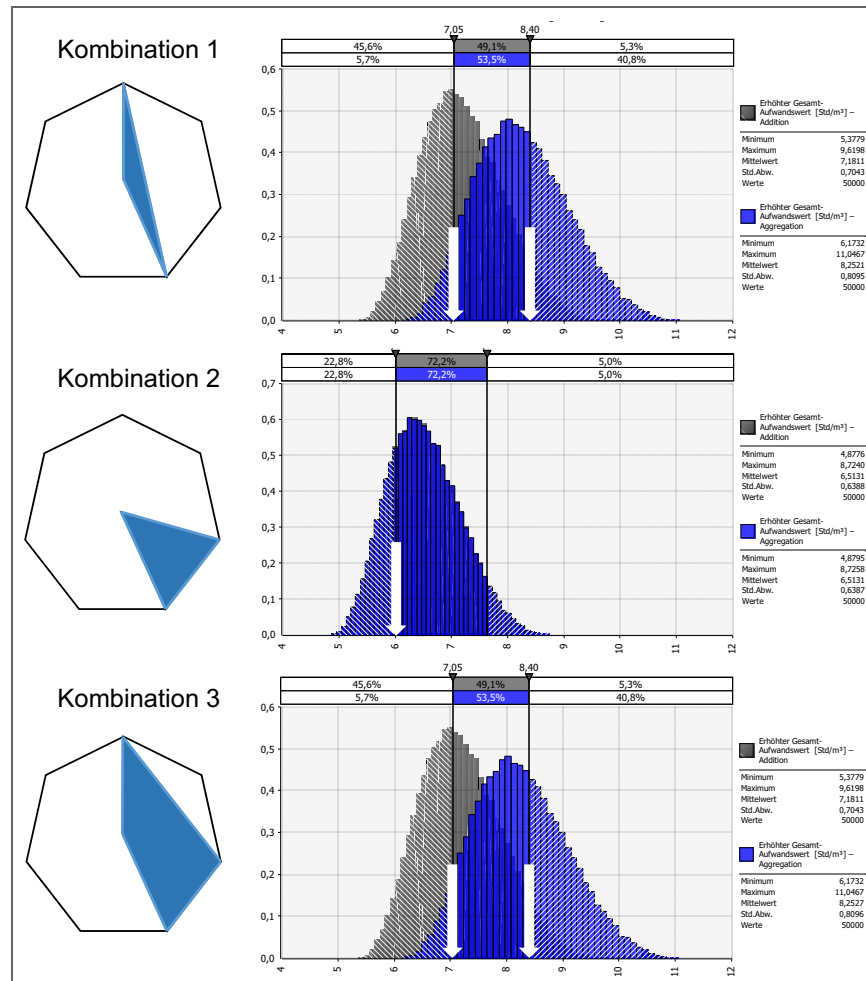


Abb. 8-18 Vergleich der Ergebnisse der betrachteten Kombinationen

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass für die Aufwandswerterhöhungen angenommen wurde, dass diese über die gesamte Bauzeit in gleicher Intensität auftreten. Wie mit Hilfe der ExpertInnenbefragung erhoben wurde, treten die meisten Produktivitätsverluste jedoch in der Hauptbauphase auf. Außerdem wurde für die Ermittlung der erforderlichen Anzahl an Kranen die maximale Anzahl an Arbeitskräften herangezogen. Diese bezieht sich auf die Hauptbauphase eines zugrunde gelegten Trapezmodells des Einsatzes der Produktionsfaktoren. Die Dauer der Hauptbauphase ergibt sich nach Glg. (8-2).<sup>27</sup>

$$D_{HP} = \frac{2 \cdot D_{GES} \cdot AK_{STB,MW}}{AK_{STB,MAX}} - D_{GES} \quad (8-2)$$

Das Verhältnis zwischen mittlerer und maximaler Anzahl an Arbeitskräften (=  $AK_{STB,MW} / AK_{STB,MAX}$ ) wurde im Beispiel als Eingabwert festgelegt.<sup>28</sup> Die vom AG vorgegebene Bauzeit  $D_{GES}$  beträgt 299 d. Damit kann durch Einsetzen in Glg. (8-2) die Dauer der Hauptbauphase  $D_{HP}$  bzw. der prozen-

<sup>27</sup> Vgl. Hofstadler (2007). Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 62

<sup>28</sup> Für die deterministischen Berechnungen beträgt das Arbeitskräfteverhältnis 0,80 und für die probabilistischen Berechnungen wurde eine Dreiecksverteilung (0,75; 0,80 und 0,85) angesetzt (siehe Tab. 8-21 – Seite 302).

tuelle Anteil der Hauptbauphase berechnet werden. Für die probabilistischen Berechnungen ergibt sich für den prozentuellen Anteil der Hauptbauphase folgendes Histogramm.

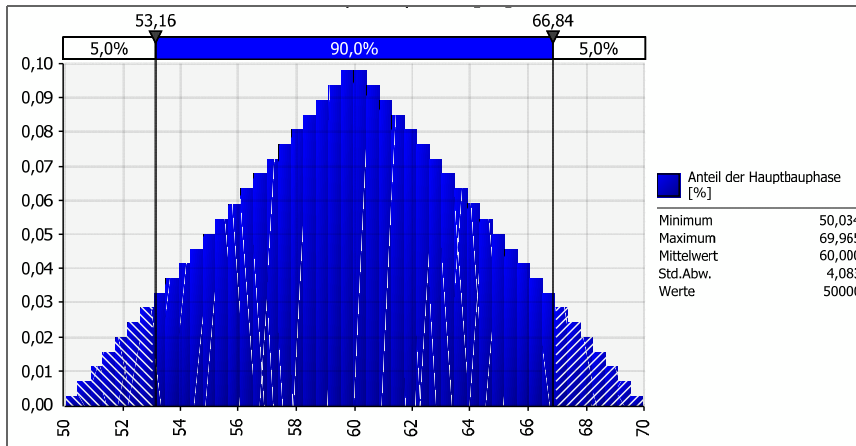


Abb. 8-19 Prozentueller Anteil der Hauptbauphase

Die Dreiecksverteilung des Histogramms ergibt sich, da auch die Eingabe für das Arbeitskräfteverhältnis einer Dreiecksverteilung entspricht und dieser lediglich mit anderen deterministischen Werten in die Berechnung des prozentuellen Anteils der Hauptbauphase einfließt.

Die prozentuelle Aufwandswerterhöhung für die Aggregation der Kombination 3 zeigt eine sehr enge Bandbreite von ca. 26,6 % bis ca. 27,9 % (siehe Abb. 8-20).

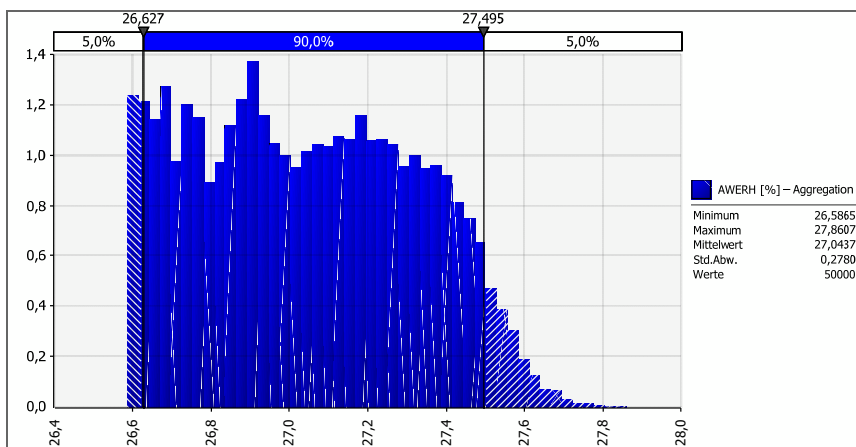


Abb. 8-20 Prozentuelle Aufwandswerterhöhung – Kombination 3 – Aggregation

Multipliziert mit dem prozentuellen Anteil der Hauptbauphase ergibt sich eine Verteilung für die Aufwandswerterhöhung wie sie in Abb. 8-21 dargestellt ist. Auch dieses Histogramm ähnelt einer Dreiecksverteilung, da die prozentuelle Aufwandswerterhöhung (siehe Abb. 8-20) keine große Bandbreite aufweist und mit der Dreiecksverteilung für den prozentuellen Anteil der Hauptbauphase multipliziert wird.

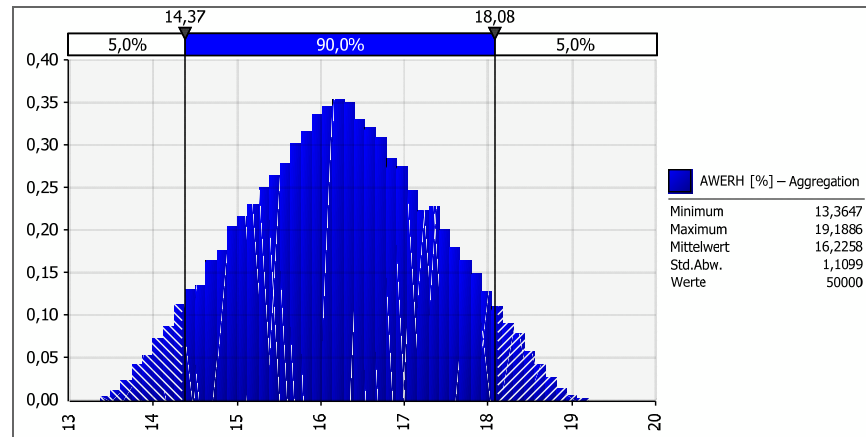


Abb. 8-21 Prozentuelle Aufwandswerterhöhung – Kombination 3 – Aggregation – auf den Anteil der Hauptbauphase umgelegt

Für den Zusammenhang zwischen vorgegebener Bauzeit und der damit in Verbindung stehenden Aufwandswerterhöhung wurde von Hofstadler<sup>29</sup> eine ExpertInnenbefragung durchgeführt und die Ergebnisse in Form eines Kurvenverlaufs dargestellt. Dieser Kurvenverlauf für eine Bauzeitverkürzung wird gemeinsam mit dem Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit, der in der vorliegenden Studie erhoben wurde, in einem Diagramm dargestellt (siehe Abb. 8-22).

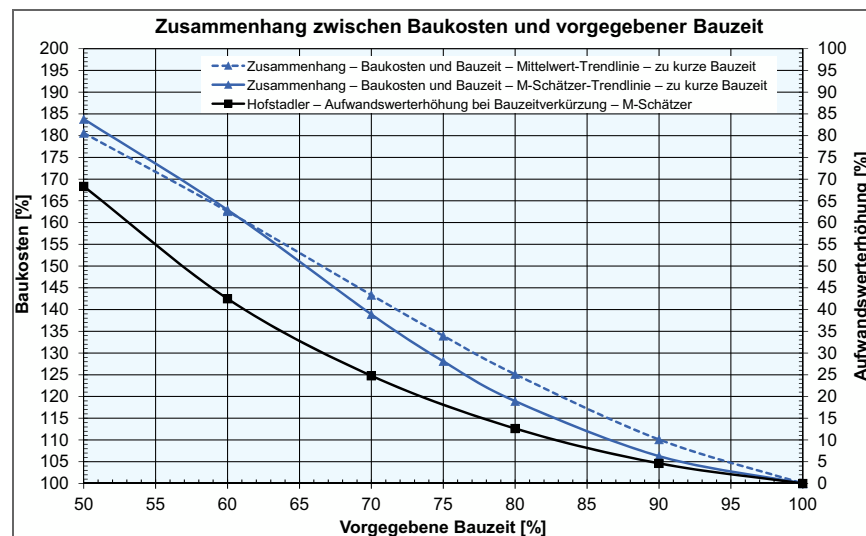
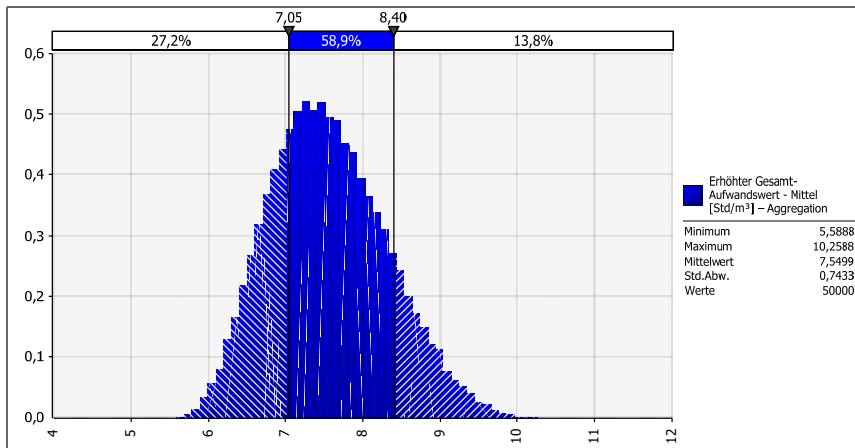


Abb. 8-22 Vergleich der nichtlinearen Kurvenverläufe für den Zusammenhang der vorgegebenen Bauzeit und der Baukosten bzw. der Aufwandswerterhöhung

Für eine Bauzeit von 75 % (entspricht einer 25 %igen Bauzeitverkürzung) kann eine Aufwandswerterhöhung von ca. 18 % aus dem Diagramm abgelesen werden. Dieser Wert liegt im oberen Bereich der für dieses Beispiel ermittelten Bandbreite der prozentuellen Aufwandswerterhöhung,

<sup>29</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb. S. 455

die auf den Anteil der Hauptbauphase umgelegt wurde (siehe Abb. 8-21 – probabilistische Aggregation der Produktivitätsverluste für Kombination 3).



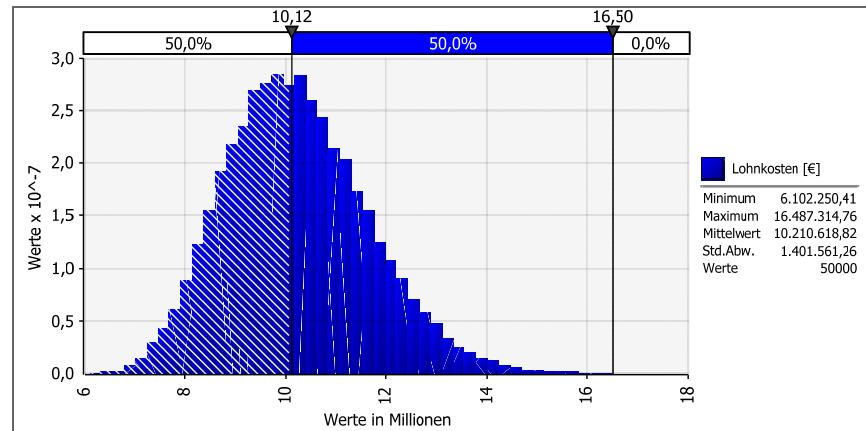
**Abb. 8-23** Erhöhter Aufwandswert – Kombination 3 – Aggregation – auf den Anteil der Hauptbauphase umgelegt

Verglichen mit der Kostenkurve aus der aktuellen Umfrage ist zu erkennen, dass über die Aufwandswerterhöhung zusätzliche Kostenerhöhungen bei einer Verkürzung der Bauzeit zu erwarten sind. Dies wird mit einem verstärkten Geräte- und Materialeinsatz begründet, je kürzer die Bauzeit vorgegeben wird.

Bei nur geringfügigen Unterschreitungen der normalen Bauzeit sind die Kostenerhöhungen überwiegend mit höherem Personaleinsatz bzw. auftretenden Produktivitätsverlusten zu begründen. Je kürzer die Bauzeit allerdings wird, desto mehr nimmt der Anteil „Sonstiges“ (Geräte und Material) der Kosten zu, da nicht nur personelle sondern auch Geräte- und Materialkapazitäten erhöht werden müssen, um die verkürzte Bauzeit einzuhalten und insgesamt eine höhere tägliche Leistung erbringen zu können.

Wird der erhöhte Aufwandswert (umgelegt auf den Anteil der Hauptbauphase – Abb. 8-23) mit der Stahlbetonmenge sowie mit den Mittellohncosten (beide Parameter als Dreiecksverteilungen modelliert – siehe Tab. 8-21) multipliziert, ergeben sich die Lohnkosten ebenfalls als Histogramm (siehe Abb. 8-24).

Letztendlich muss für eine konkrete Entscheidung innerhalb der angegebenen Bandbreite immer ein deterministischer Wert angegeben werden. Dieser kann jedoch mit Hilfe der Ergebnisse einer probabilistischen Berechnung auf Basis eines gewünschten Chancen-Risiko-Verhältnisses gewählt werden. Mit der Entscheidung für einen spezifischen Wert ist direkt die damit verbundene Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeit bekannt. Ein Gleichgewicht zwischen Risiko und Chance ist für dieses Beispiel bei Lohnkosten in der Höhe von ca. 10,12 Mio. € gegeben (siehe Abb. 8-24). Die Spannweite der Ergebnisse kann durch das Einholen zusätzlicher Informationen bzw. durch das Einengen der Bandbreiten für die Inputparameter verkleinert werden. Die Bandbreiten der Inputparameter sowie die angesetzten Korrelationen wirken sich dabei direkt auf die Bandbreiten der Simulationsergebnisse aus.



**Abb. 8-24** Lohnkosten – Kombination 3 – Aggregation – auf den Anteil der Hauptbauphase umgelegt

Welcher Wert innerhalb der ermittelten Bandbreiten gewählt wird, bleibt weiterhin im Entscheidungsbereich des/der Experten/Expertin. Das Werkzeug der Monte-Carlo-Simulation kann nur Entscheidungen vorbereiten und die vorhandenen Informationen um Bandbreiten und Unsicherheiten systematisch in den Berechnungen berücksichtigen. Im Zentrum steht weiterhin der Mensch, der mit baubetrieblichem und bauwirtschaftlichem Sachverstand die Ergebnisse der Simulationen interpretieren und analysieren muss.

## 8.10 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde anhand eines Beispiels die Berücksichtigung unterschiedlicher Produktivitätsverluste bezogen auf die Stahlbetonarbeiten gezeigt. Es wurden dabei sowohl deterministische als auch probabilistische Berechnungen für unterschiedliche Kombinationen durchgeführt. Die Betrachtungen erfolgten als reine Additionen bzw. auch als Aggregationen der Produktivitätsverluste und wurden einander vergleichend gegenübergestellt. Es konnte gezeigt werden, dass durch eine reine Addition der Produktivitätsverluste höhere Aufwandswerte tendenziell unterschätzt und niedrige Aufwandswerte bezüglich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit eher überschätzt werden.

Dem Umstand, dass bestimmte Kombinationen an Produktivitätsverlusten nicht über die gesamte Bauzeit auftreten, wurde dadurch Rechnung getragen, dass die ermittelte prozentuelle Aufwandswerverhöhung auf jenen Anteil der Gesamtbauzeit (z.B. Hauptbauphase) umgelegt wird, in dem die Produktivitätsverluste erwartet werden.

Die gezeigte Systematik kann auch für die Betrachtung von Bauwerksteilen, Fertigungsabschnitten oder auch für einzelne Bauteile herangezogen werden.

Durch die Berücksichtigung der Nichtlinearitäten ergibt sich für AN der Nutzen, dass Ressourcenengpässe und mögliche Forcierungsmaßnahmen bereits im Vorhinein erkannt werden können. Auswirkungen von Leistungsän-

derungen und Änderungen der Umstände der Leistungserbringung, die sich auf Einzelproduktivitätsverluste auswirken, können transparent und systematisch prognostiziert und gegenüber dem AG kommuniziert werden. Weiters können Mehrkostenforderungen plausibilisiert und konkretisiert werden.

Für AG ergibt sich der Nutzen dadurch, dass die Folgen einer zu kurz angesetzten Bauzeit selbst beurteilt und bewertet sowie Mehrkostenforderung der AN verifiziert und kontrolliert werden können. Weiters ist die Gegenüberstellung der Mehrkosten aufgrund zu kurzer Bauzeit dem monetären Nutzen eines früheren Fertigstellungstermins möglich. Zu beachten sind hier allerdings auch evtl. auftretende Qualitätsmängel aus einer schnelleren Ausführung (Trocknungszeiten, keine Zeit für Nachbesserungen/Nachbehandlungen etc.).

Sachverständige können auf die erhobenen Angaben (Kurvenverläufe) aus der Praxis zurückgreifen und für Argumentationen bzw. zur Nachweisführung nutzen. Einschätzungen zu Aufwandswerterhöhungen und störungsbedingten Produktivitätsverlusten können rechnerisch nachvollzogen und plausibilisiert werden. Die Berechnungen und Annahmen werden dadurch wesentlich transparenter und nachvollziehbarer.

Der Nutzen probabilistischer Berechnungen wird durch den direkten Vergleich mit deterministischen Ergebnissen deutlich. Die Aussagekraft deterministischer Werte erhöht sich, sobald durch die Ergebnisse der probabilistischen Berechnungen (in Form von Bandbreiten und Histogrammen) zusätzliche Informationen transportiert werden. Außerdem kann durch die Wahl eines deterministischen Werts innerhalb der betrachteten Bandbreite direkt auf das eingegangene Chancen-Risiko-Verhältnis geschlossen werden.





## 9 Zusammenfassung

Die Baukosten- und Bauzeitermittlung gilt als eine der verantwortungsvollsten Aufgaben im Baubetrieb und der Bauwirtschaft und ist geprägt von Unsicherheiten und nichtlinearen Wirkungszusammenhängen. Die Nichtberücksichtigung dieser Zusammenhänge führt in der Praxis immer wieder zu Kosten- und Bauzeitüberschreitungen. Dieser Umstand wurde für die vorliegende Forschungsarbeit zum Anlass genommen, konzeptionell auf die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten einzugehen. Es wurden dabei sowohl deterministische als auch probabilistische Betrachtungen durchgeführt.

Im Zuge der Vorstudie konnte gezeigt werden, dass der Risikobegriff nicht eindeutig definiert ist und in unterschiedlichen Disziplinen abweichend aufgefasst und verwendet wird. Der Risikobegriff und verwandte Begrifflichkeiten wurden in Kapitel zwei für den Baubetrieb und die Bauwirtschaft unter der Gesamtheit der Erwartung eingeordnet und sortiert. Wesentlich ist dabei die Trennung von Risiko und Chance, da auch in der Praxis der Risikobegriff eher negativ (im Sinne der Zielabweichung) behaftet ist. Chancen und Risiken werden daher als horizontal gleichwertige Begriffe verstanden. Weiters ist hervorzuheben, dass auch subjektive Wahrscheinlichkeiten die Verwendung des Begriffs „Risiko“ nicht ausschließen sollten, da gerade in der Bauwirtschaft bzw. bei baubetrieblichen Betrachtungen häufig auf Erfahrungswerte und subjektive Einschätzungen zurückgegriffen werden muss. Diese Einschätzungen fließen in weiterer Folge in Kalkulationen, Bauzeitermittlungen und Verfahrensentscheidungen ein und werden somit integraler Bestandteil der baubetrieblichen, bauwirtschaftlichen und vertraglichen Abwicklung von Bauprojekten.

Im Zentrum der Arbeit steht die Produktivität, die als wesentliche Kennzahl für den Baubetrieb und die Bauwirtschaft angesehen wird und einen zentralen Begriff bei der Durchführung von Bauleistungen darstellt. Sie dient zur Beurteilung der Ergiebigkeit einzelner Arbeiten oder des gesamten Produktions- bzw. Wirtschaftsprozesses und wird durch das Verhältnis von Output zu Input dargestellt. Ziel ist die optimale Kombination der elementaren Produktionsfaktoren (Arbeit, Betriebsmittel und Stoffe) unter Einbeziehung der dispositiven Produktionsfaktoren (Planung, Steuerung, Kontrolle etc.). In Kapitel drei wurden die Grundlagen zu baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Kennzahlen dargestellt und speziell auf den Zusammenhang zwischen der Produktivität, dem Aufwandswert und der Leistung eingegangen.

In Kapitel vier konnte anhand von Literaturangaben – über den Zusammenhang zwischen vorgegebener Bauzeit und Baukosten – gezeigt werden, dass baubetriebliches und bauwirtschaftliches Handeln durch nichtlineare Zusammenhänge und Unsicherheiten geprägt ist.

Mehrheitlich wird bei einer zu kurzen Bauzeit ein höherer Kostenanstieg vermutet als bei einer zu langen Bauzeit. Teilweise sind die angegebenen Kurvenverläufe kritisch zu hinterfragen bzw. auf deren Anwendbarkeit zu überprüfen.

Als Gründe für den nichtlinearen Zusammenhang wurden unter anderem Abweichungen von der normalen Bauzeit und daraus entstehende Produktivitätsverluste identifiziert. Die Ursachen für diese Produktivitätsverluste liegen dabei in unterschiedlichen endogenen und exogenen Einflüssen.

Nichtlineare Kurvenverläufe für Einzelproduktivitätsverluste, bezogen auf Stahlbetonarbeiten, wurden in Form von Diagrammen und Gleichungen angegeben. Auf das gleichzeitige Auftreten von Produktivitätsverlusten sowie die Unterscheidung zwischen Addition und Aggregation von Produktivitätsverlusten wurde ebenfalls eingegangen.

Der Einfluss von Nichtlinearitäten und die Arten möglicher Zusammenhänge zwischen zwei Variablen bilden wesentliche Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit und zeigen die Problematik auf, die mit linearen Ansätzen in der Modellbildung verbunden ist.

In Kapitel fünf wurden die Grundlagen der Monte-Carlo-Simulation sowie die Grundlagen zur Anwendung dieser dargestellt. Wichtige Begriffe für den Einsatz der Methode sowie für die Ergebnisinterpretation wurden dazu definiert. Speziell wurde auf den Einfluss der Verteilungsfunktionen der Inputparameter auf die Outputs eingegangen. Anhand von Literaturanalysen konnte erhoben werden, welche Verteilungen im Baubetrieb und in der Bauwirtschaft häufig für Inputs angesetzt werden.

Auffällig ist die häufige Angabe von stetigen, geschlossenen, unimodalen Verteilungen. Sehr oft wird auch angegeben, dass rechtsschiefe Verteilungen anzusetzen sind. Diskrete Verteilungen werden in seltenen Fällen angewendet; multimodale und linksschiefe Verteilungen werden in den zitierten Literaturquellen nicht explizit angesetzt.

In der Mehrheit der Literaturangaben wird nur aufgrund von theoretischen Überlegungen auf die Form der Verteilungen geschlossen. In seltenen Fällen erfolgt eine Erhebung über historisches Datenmaterial oder aufgrund von Befragungsergebnissen. Liegt eine Datenbasis vor, werden auch häufig theoretische Überlegungen in die Wahl der Verteilungen miteinbezogen.

Weiters wurde gezeigt, welchen Einfluss Korrelationen auf die Ergebnisse einer Monte-Carlo-Simulation haben können und welche Besonderheiten bei der Eingabe in das Programm @Risk zu beachten sind.

Es erfolgte eine ähnliche Literaturanalyse wie für die Verteilungsfunktionen. Häufig werden positive Korrelationen angegeben, obwohl die tatsächliche Anwendung in Simulationen meist mit dem Argument des großen Aufwands bei der Modellierung und wertmäßigen Beurteilung der Korrelationskoeffizienten nicht stattfindet. Von einigen Autoren werden negative Korrelationen generell vernachlässigt, obwohl ihre Bedeutung für die Outputwerte teilweise hervorgehoben wird. Konkrete, allgemeingültige Angaben von Korrelationskoeffizienten werden nur vereinzelt angeführt. Häufig werden lediglich qualitative Angaben zur Art der Korrelationen (positiv, negativ, unabhängig) getätigt.

Generell sollte bei der Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen und bei der Interpretation von Simulationsergebnissen der Einfluss von Korrelationen ins Bewusstsein gerückt werden. Dies gilt vor allem für Outputs, die hinsichtlich ihrer Spannweite oder möglicher maximaler und minimaler Werte beurteilt werden sollen. Hier ist eine vertiefte Auseinandersetzung mit und Erhebung von Korrelationskoeffizienten besonders wichtig. Aus der Literaturanalyse ist beim Risikomanagement und in der Kalkulation eine Tendenz zu positiven Korrelationen erkennbar. Eine pauschale Aussage ist jedoch nicht möglich und muss je nach Anwendungsfall gesondert untersucht werden.

Den Abschluss der Hauptstudie bildet eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile bei der Anwendung der Monte-Carlo-Simulation.

Im Zuge der Detailstudie wurde eine ExpertInnenbefragung durchgeführt, bei der insgesamt 27 TeilnehmerInnen (mittlere Berufserfahrung: ca. 18 Jahre) mitwirkten. Ausgewählte Fragen zum Thema der Produktivitätsverluste, dem Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit sowie der Korrelationen zwischen Parametern zur Berechnung des Gesamt-Aufwands werts der Stahlbetonarbeiten wurden in Kapitel sechs ausgewertet.

Anhand der durchgeführten ExpertInnenbefragung konnten neue Erkenntnisse erhoben bzw. vorhandenes Wissen über das gemeinsame Auftreten von Einzelproduktivitätsverlusten gesichert werden. Die Befragten sehen bei einer zu kurz vorgegebenen Bauzeit ein deutlich höheres Potential für das Auftreten von Produktivitätsverlusten als bei einer zu langen Bauzeit. Auch der Kostenanstieg bei einer zu kurz vorgegebenen Bauzeit wird steiler vermutet als bei einer zu langen Bauzeit. Die häufigsten Nennungen für das Eintreten von Produktivitätsverlusten gaben die ExpertInnen für die Hauptbauphase ab.

Schließlich wurden anhand einer Ratingskala Korrelationskoeffizienten zwischen den fünf Berechnungsparametern des Gesamt-Aufwands werts der Stahlbetonarbeiten erhoben und die Ergebnisse für korrelierte und unabhängige Inputs miteinander verglichen.

Die Auswertung der ExpertInnenbefragung erfolgt mit Hilfe von deskriptiven und grafischen Auswertungen. Hervorzuheben ist dabei die Ermittlung robuster Mittelwertschätzer (M-Schätzer nach Huber) sowie die Darstellung der Antworten in Form von Violinplots.

Auf die Grundlagen der Modellierung und die Vorgehensweise bei der Erstellung eines Berechnungsmodells, welches Nichtlinearitäten und Unsicherheiten für die Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten berücksichtigt, wurde in Kapitel sieben eingegangen. Der qualitative Wirkungszusammenhang für die konkrete Aufgabenstellung wurde anhand eines Wirkungsgraphen (Grob betrachtet) bzw. eines Ablaufdiagramms (Detail betrachtet) dargestellt. Die mathematische Beschreibung der Addition und Aggregation von Produktivitätsverlusten bei vorgegebener Bauzeit erfolgte in Form von Gleichungen, bei denen bewusst auf eine zu detaillierte Schreibweise verzichtet wurde.

Die Ziel- und Wegbeschreibung des geforderten Modells wurde in Form eines tabellarisch aufgelisteten Lasten- bzw. Pflichtenhefts erarbeitet. Am Ende des Kapitels wurde durch die Beschreibung eines Regelkreises eine

Einführung in die (mehrdimensionale) Optimierung mittels Simulationen gegeben.

Ein Anwendungsbeispiel, anhand dessen die Umsetzung der Addition bzw. Aggregation von Produktivitätsverlusten im Zuge einer Grobbetrachtung für Stahlbetonarbeiten gezeigt wurde, bildet die Systemeinführung. Es wurden dabei sowohl deterministische als auch probabilistische Berechnungen durchgeführt und die Ergebnisse einander gegenübergestellt und interpretiert.

## 9.1 Kommentare zu den Thesen der Arbeit

Der vorliegenden Arbeit wurden folgende Thesen zugrunde gelegt, die nachfolgend kommentiert werden.

- **AG und AN wissen oft nicht, welche Risiken und Chancen sie mit ihren Ansätzen eingehen.**

Da die deterministische Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten den Status quo darstellt, können AG und AN mit ihren Berechnungen keine Aussage über mögliche Eintrittswahrscheinlichkeiten treffen und somit auch nicht angeben, welche Chancen und Risiken sie mit ihren Ansätzen überhaupt eingehen.

- **Die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten bei der Berechnung von Baukosten ist systematisch möglich.**

Im Zuge der Arbeit konnte gezeigt werden, dass mit entsprechenden Berechnungsmodellen und auf Basis von solidem Datenmaterial (im konkreten Fall Kurvenverläufe für Aufwandswerterhöhungen aus einer ExpertInnenbefragung) Nichtlinearitäten in den Berechnungen systematisch berücksichtigt werden können.

- **Durch die Einbeziehung von Bandbreiten und die Berücksichtigung von Unsicherheiten werden die Voraussetzungen zur Ermittlung der „Kostenwahrheit“ gegeben.**

Die Berechnungen von Baukosten und Bauzeiten werden aufgrund von Erfahrungswerten (entweder subjektiv aus der Erinnerung bzw. persönlichen Einschätzungen oder systematisch aufgrund von erhobenen Daten aus aktuellen bzw. abgeschlossenen Projekten) durchgeführt und stellen eine Vorhersage (Prognose) für zukünftige Entwicklungen/Ereignisse dar. Sämtliche Berechnungen sind daher mit Unsicherheiten behaftet, die mittels probabilistischer Berechnungsverfahren integriert werden können. Deterministische Ergebnisse liefern lediglich eine Zahl, die die vorhandenen Unsicherheiten nicht systematisch berücksichtigen kann. Der Schritt zu probabilistischen Berechnungen ist daher wesentlich, um die „Kostenwahrheit“ (inkl. der unvermeidbaren Unsicherheiten) abzubilden.

- **Der Mehraufwand in der Berechnung ist durch die Schaffung einer soliden Entscheidungsbasis gerechtfertigt.**

In der Entscheidungsvorbereitung ist es von Interesse mit welcher Wahrscheinlichkeit – auf Basis des aktuellen Wissensstands – ein deterministischer Wert voraussichtlich über- oder unterschritten wird. Aus

Ergebnissen probabilistischer Berechnungen können Bandbreiten und Eintrittswahrscheinlichkeiten abgelesen werden, die die Grundlage solider Entscheidungen darstellen. Der Mehraufwand in der Modellbildung und Eingabe ist dadurch gerechtfertigt, dass bereits zu einem frühen Zeitpunkt bewusst über Nichtlinearitäten und Unsicherheiten der Inputparameter reflektiert wird. Negative Effekte treten damit bereits früh ins Bewusstsein und Gegensteuerungsmaßnahmen können proaktiv geplant und eingeleitet werden. Bestehende Modelle für spezifische Fragestellungen können dabei für neue Projekte herangezogen, überarbeitet bzw. erweitert werden, um Synergieeffekte zu nutzen.

## 9.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Am Beginn dieser Arbeit wurden fünf Forschungsfragen gestellt, die zusammenfassend beantwortet werden.

- **Wie werden die Begriffe „Risiko“ und „Chance“ im Baubetrieb und der Bauwirtschaft aufgefasst und in der Praxis verwendet?**

Die durchgeführte Literaturanalyse zeigt, dass eine einheitliche Verwendung der Begriffe Risiko und Chance nicht gegeben ist und eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen vorhanden ist. Grundsätzlich können zwei Definitionen unterschieden werden. Dabei wird immer von positiven oder negativen Abweichungen eines geplanten Solls zu einem vorgefundenen Ist gesprochen. Einerseits bezeichnet ein „Risiko“ lediglich die negativen Abweichungen, wobei die möglichen positiven Abweichungen „Chancen“ genannt werden. Andererseits wird unter „Risiko“ sowohl die Möglichkeit einer positiven („Chance“) als auch einer negativen Abweichung („Gefahr“) verstanden. Hier impliziert das Risiko sowohl die Gefahr als auch die Chance. Eine am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz durchgeführte ExpertInnenbefragung ergab, dass die Mehrheit der Befragten den Begriff „Risiko“ eher mit negativen Auswirkungen assoziiert. Risiko und Chance wurden in weiterer Folge in die mögliche Erwartungsstruktur eingeordnet und als horizontal gleichwertige Begriffe verwendet. Entscheidend für das Chancen-Risiko-Verhältnis ist die gewählte Basis, die in Form eines deterministischen Werts innerhalb der vorhandenen Bandbreiten gewählt wird.

- **Ist ein Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit vorhanden?**

Sowohl aus der Literaturanalyse als auch aus der durchgeführten ExpertInnenbefragung konnte erhoben werden, dass ein direkter oder zumindest ein wesentlicher Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit besteht. Ausgehend von einer normalen Bauzeit, bei der die geringsten Kosten zu erwarten und die Voraussetzungen für eine optimale Kombination der Produktionsfaktoren gegeben sind, wird bei einer zu kurzen Bauzeit ein höherer Kostenanstieg vermutet als bei einer zu langen Bauzeit. Bei zu langer Bauzeit wirken sich besonders die höheren zeitgebundenen Kosten und Produktivitätsverluste negativ aus. Bei zu kurzer Bauzeit sind Forcierungsmaßnahmen wie z.B. ein höherer Personal- und Geräteinsatz, Überstunden oder sogar ein Mehrschichtbetrieb erforderlich. Mit diesem erhöhten Ressourceneinsatz können bei

Über- bzw. Unterschreitung spezifischer Grenzgrößen Produktivitätsverluste eintreten, die sich gegenseitig beeinflussen und „aufschaukeln“. Die von den ExpertInnen angegebenen Kostenverläufe wurden überwiegend nichtlinear angegeben und konnten in eine Kurve auf Basis von M-Schätzern übergeführt werden.

- **Sind deterministische Betrachtungen dazu geeignet, genaue Berechnungen der Baukosten und Bauzeiten für die Zukunft – die auf unsicheren Parametern beruhen – durchzuführen?**

Deterministische Berechnungen liefern grundsätzlich sehr präzise, aber nicht zwingend genaue Ergebnisse. Wesentlicher Nachteil von deterministischen Berechnungen ist die Tatsache, dass die den Berechnungen zugrunde liegenden Unsicherheiten der Inputparameter nicht systematisch in die Berechnungen einfließen. Vorhandenes Wissen um Bandbreiten fließt demnach nicht in die Ermittlungen von Baukosten und Bauzeiten ein und kann daher im Zuge der Ergebnisinterpretation auch nicht berücksichtigt werden. Je weiter Prognosen in die Zukunft reichen, desto unsicherer werden die getätigten Aussagen und desto wichtiger ist es, das gesamte Spektrum möglicher Ergebnisse aufzuzeigen. Entscheidungen – die letztendlich immer in Form von deterministischen Werten getätigt werden müssen – können durch den Einsatz probabilistischer Berechnungsverfahren auf Basis eines gewählten Chancen-Risiko-Verhältnisses getätigt werden. Deterministische Berechnungen sind damit nur bedingt (z.B. in Form von Min-Max-Betrachtungen) für Aussagen über zukünftige Baukosten und Bauzeiten geeignet.

- **Wie erfolgt die Wahl von Verteilungsfunktionen und der Einsatz von Korrelationen bei Monte-Carlo-Simulationen im Bereich des Baubetriebs und der Bauwirtschaft?**

Der Wahl von Verteilungsfunktionen für Inputparameter kommt eine essentielle Bedeutung im Zuge der Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen zu. Sie bestimmen die Form der Outputs mit und bieten die Grundlage, unsinnige oder gar unmögliche Ergebnisse von vornherein auszuschließen. Grundsätzlich können bei der Erhebung von Verteilungsfunktionen drei Methoden unterschieden werden:

- Theoretische Überlegungen/Charakteristika
- Datenerhebungen (ex post oder inter actio)
- ExpertInnenbefragungen (ex ante)

Besonders zu empfehlen sind Kombinationen der Erhebungsmethoden, bei denen Fittings auf Basis von Datenerhebungen und/oder ExpertInnenbefragungen mit theoretischen Überlegungen/Charakteristika kombiniert werden.

Neben der Wahl von Verteilungsfunktionen beeinflusst auch der Einsatz von Korrelationen die Bandbreite der Ergebnisse einer Monte-Carlo-Simulation. Die Erhebung von Korrelationen kann bei einer entsprechend vorhandenen Datenbasis indirekt ermittelt werden oder durch ExpertInnenbefragungen direkt durch Angabe von Korrelationskoeffizienten erfolgen.

In der durchgeführten ExpertInnenbefragung wurden Korrelationskoeffizienten für die Parameter des Gesamt-Aufwandswerts durch qualifizierte Einschätzungen anhand einer Ratingskala erhoben.

- **Wie können Nichtlinearitäten und Unsicherheiten in die Kalkulation und Bauzeitermittlung mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation systematisch integriert werden?**

Um Nichtlinearitäten bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten integrieren zu können, sind zunächst entsprechende Kurvenverläufe für Zusammenhänge zwischen den Parametern zu erheben. Besonderes Augenmerk wurde in der vorliegenden Arbeit auf die Produktivitätsverluste bzw. Aufwandswerterhöhungen und deren gemeinsames Auftreten gelegt. Dabei verhalten sich die Aufwandswerterhöhungen gegenüber Änderungen der Einflussgrößen nicht linear. Die für die Berechnungen herangezogenen Kurvenverläufe wurden aus einer an der TU Graz durchgeführten ExpertInnenbefragung<sup>1</sup> für Stahlbetonarbeiten herangezogen und durch Gleichungen für die Trendlinienverläufe der M-Schätzer in das Berechnungsmodell integriert. Die Implementierung der nichtlinearen Verläufe erfolgte dabei in einer MS Excel Datei und kann daher einfach bearbeitet, angepasst und schrittweise nachvollzogen werden.

Die Berücksichtigung von Unsicherheiten erfolgt durch die Erweiterung des deterministischen Berechnungsmodells um probabilistische Inputparameter. Dadurch ist es möglich, die etwaigen Bandbreiten der Inputs systematisch in die Simulationen zu integrieren. Die Festlegung auf einen spezifischen Wert erfolgt erst beim Ergebnis und muss nicht für jeden Eingabeparameter gesondert getroffen werden.

### 9.3 Nutzen der Arbeit

Die vorliegende Arbeit behandelt das nichtlineare Verhalten von Aufwands- und Leistungswerten im Hinblick auf die Arbeitsproduktivität unter unsicheren Inputparametern bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten.

In der Vorstudie wird das Chancen- und Risikoverständnis für den Baubetrieb und die Bauwirtschaft aus der Literatur, einschlägigen Regelwerken und durch Befragungsergebnisse hergeleitet und der Erwartung unter Unsicherheit zugeordnet. Weiters wurde auf die für diese Arbeit zentralen Kennzahlen (Produktivität, Aufwandswert, Leistung), deren Zusammenhang und die Auswirkungen von Produktivitätsverlusten, eingegangen.

Der nichtlineare Baukostenverlauf in Abhängigkeit von der vorgegebenen Bauzeit und die Unsicherheiten, die direkt mit Aussagen über die Zukunft in Zusammenhang stehen, bilden den Kern der Hauptstudie. Fünf mögliche Typen deterministischer und probabilistischer Zusammenhänge zwischen zwei Variablen wurden dargestellt und beschrieben. Weiters sind der Arbeit für unterschiedliche Einzelproduktivitätsverluste Kurven für Aufwandswerterhöhungen bei Stahlbetonarbeiten zu entnehmen. Die nichtlinearen Verläufe wurden durch eine ExpertInnenbefragung an der TU Graz (durchgeführt von Hofstadler) erhoben und als Trendlinien der M-Schätzer sowohl in

<sup>1</sup> Vgl. Hofstadler (2014). Produktivität im Baubetrieb.

Diagramme als auch in Gleichungen übergeführt. Für die rechnerische Berücksichtigung gleichzeitig auftretender Produktivitätsverluste wurde in eine einfache Addition und eine Aggregation der Effekte unterschieden.

Die Grundlagen zur Anwendung der Monte-Carlo-Simulation wurden ausführlich dargestellt. Kapitel fünf (als Teil der Hauptstudie) dient dabei auch für zukünftige Arbeiten, die das Werkzeug der Monte-Carlo-Simulation anwenden, als übersichtliche Zusammenfassung. Welche Auswirkungen die Wahl der Verteilungsfunktionen und Korrelationen auf die Outputs haben, wurde gezeigt. Die Ausführungen werden durch selbst entwickelte und aus der Literatur weitergeführte Beispiele und zahlreiche Abbildungen aufbereitet. Ausführliche Literaturanalysen geben einen Überblick, welche Verteilungsfunktionen und Korrelationen bisher im Bereich des Baubetriebs und der Bauwirtschaft eingesetzt wurden.

Über das Zusammenwirken unterschiedlicher Produktivitätsverluste sowie das Auftreten dieser über die Bauzeit wurden durch eine ExpertInnenbefragung (durchgeführt von Kummer/Hofstadler) neue Erkenntnisse aus der Praxis gewonnen. Ebenso wurde gezeigt, wie die Erhebung von Korrelationskoeffizienten direkt durch Einschätzungen der Befragten anhand einer Ratingskala erfolgen kann. Weiters wurde auch der nichtlineare Verlauf der Baukosten bei unterschiedlich vorgegebener Bauzeit durch die ExpertInnen bestätigt und konnte in ein Diagramm bzw. in Gleichungen für die Trendlinien robuster Mittelwertschätzer (M-Schätzer) übergeführt werden. Die Auswertung und Analyse der Umfrageergebnisse erfolgte anhand von deskriptiven Statistiken, Diagrammen, Häufigkeitsverteilungen sowie Violinplots und wurde nachvollziehbar dargestellt.

Ein Berechnungsmodell bildet den Systembau für die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten. Die Grundlagen zur Modellbildung sowie die qualitativen und quantitativen Wirkungszusammenhänge zwischen den Parametern (als Grob- und Detailbetrachtungen) wurden in Kapitel sieben dargestellt. Der Einsatz des Modells ist sowohl für deterministische als auch für probabilistische Berechnungen möglich und bietet somit auch die Möglichkeit Unsicherheiten der Inputparameter systematisch zu berücksichtigen. Weiters wird damit die Grundlage für die Durchführung probabilistischer Optimierungen, bezogen auf den Ressourceneinsatz, geschaffen.

Der Nutzen von nichtlinearen Betrachtungen für AN ergibt sich dadurch, dass Ressourcenengpässe und mögliche Forcierungsmaßnahmen bereits im Vorhinein erkannt werden können. Auswirkungen von Leistungsänderungen und Änderungen der Umstände der Leistungserbringung können transparent und systematisch prognostiziert und gegenüber dem AG kommuniziert werden. Weiters können Mehrkostenforderungen plausibilisiert und konkretisiert werden.

Für AG ergibt sich der Nutzen dadurch, dass die Folgen von Forcierungsmaßnahmen selbst beurteilt und bewertet sowie Mehrkostenforderungen der AN verifiziert und kontrolliert werden können. Weiters ist die Gegenüberstellung der Mehrkosten – aufgrund zu kurzer Bauzeit – dem monetären Nutzen eines früheren Fertigstellungstermins möglich. Zu beachten sind hier allerdings auch evtl. auftretende Qualitätsmängel aus einer schnelleren Ausführung (Trockenzeiten, keine Zeit für Nachbesserungen/Nachbehandlungen etc.).



Sachverständige können auf die erhobenen Angaben aus der Praxis zurückgreifen und diese für Argumentationen bzw. zur Nachweisführung nutzen. Einschätzungen zu Aufwandswerterhöhungen und störungsbedingten Produktivitätsverlusten können rechnerisch nachvollzogen und plausibilisiert werden. Die Berechnungen und Annahmen werden dadurch wesentlich transparenter.

Insgesamt wurden sämtliche Berechnungen und angeführten Beispiele nachvollziehbar, verständlich, überprüfbar und durch logische Argumentationen begründet, dargestellt. Die gezeigten Methoden tragen zur Risikominimierung für alle Beteiligten bei und fördern die Kommunikation über Unsicherheiten zwischen den handelnden Akteuren.

#### 9.4 Ausblick und Forschungsbedarf

Die Beurteilung und Bewertung unsicherer Ereignisse und Entwicklungen wird vor dem Hintergrund steigender Konkurrenz und einer generell schwierigen Marktlage zentrale Bedeutung sowohl für AG als auch für AN erlangen. Genaue Prognosen (nicht zwingend präzise aber dafür richtig) sind dabei besonders im Hinblick auf die Beurteilung der Chancen und Risiken ein zentrales Werkzeug, um Entscheidungen zu treffen und (Gegen-)Steuerungsmaßnahmen einzuleiten.

Um solide Prognosen abgeben zu können, ist eine entsprechende Datenbasis erforderlich, aus der Bandbreiten bzw. Verteilungsfunktionen, generiert werden können. Für die Erhebung, Speicherung, Kategorisierung und Aktualisierung von Daten bzw. für die Überführung in Kennzahlen zu einem systematischen Wissensspeicher bietet sich im Bereich des Baubetriebs und der Bauwirtschaft noch ein breites Forschungsfeld an. Die Frage, welche Rolle dabei virtuelle Gebäudemodelle (im Sinne des BIM) spielen ist noch nicht geklärt, bietet aber Potential, um zukünftig gezielt auf Informationen von vergangenen Projekten zugreifen zu können.

Mit der gezeigten Systematik zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten wurde der Grundstein für mehrdimensionale probabilistische Optimierungen gelegt. Anwendungen solcher Optimierungen sind dabei sowohl in der Planung als auch in der Arbeitsvorbereitung und während der Bauausführung denkbar.

Insgesamt bieten die vorhandenen Möglichkeiten, Nichtlinearitäten und Unsicherheiten systematisch zu berücksichtigen, enormes Potential, um die Produktivität im Baubetrieb und in der Bauwirtschaft zu erhöhen, da Fehlentwicklungen bzw. mögliche Produktivitätsverluste frühzeitig erkannt werden können und generell eine Sensibilisierung im Hinblick auf Unsicherheiten mit der gezeigten Vorgehensweise gefördert, aber auch von den handelnden Personen gefordert wird. Unsicherheiten zwischen den Parteien kommunizierbar zu machen ist dabei eine zentrale Aufgabe zukünftiger Forschung und Entwicklung. Für den praktischen Einsatz und die Umsetzung in konkreten Projekten ist dazu allerdings ein Umdenken bei den handelnden Personen erforderlich.

Die für Techniker ungewohnte Darstellung von Ergebnissen in Form von Bandbreiten bzw. Histogrammen bildet zukünftige Sachverhalte deutlich realistischer ab als einzelne Zahlenwerte, die eine scheinbare Sicherheit der Berechnungsergebnisse vermitteln.

Die Grundlagen und Werkzeuge sowie die Anwendbarkeit von probabilistischen Berechnungsverfahren werden bereits von unterschiedlichen Fachleuten angewendet und erfahren auch zunehmend ein verstärktes Echo aus der Wirtschaft, sowohl von Seiten der AG als auch der AN.

Die Hauptaufgabe für die Zukunft liegt neben der Modellbildung für konkrete Anwendungsfälle in der Wahl und im Ansatz der Inputparameter und damit in der Generierung und Erhebung solider Basisdaten, verknüpft mit entsprechenden Informationen, unter denen diese Daten erhoben wurden. Nur so kann ein professionelles Wissensmanagement erfolgreich betrieben werden.

Die Forschungslücke für die systematische Erfassung, Strukturierung, Sicherung und Aktualisierung einer soliden Datenbasis erstreckt sich dabei über alle Bereiche des Baubetriebs und der Bauwirtschaft und ist für das Chancen-Risiko-Management unumgänglich. Die Monte-Carlo-Simulation ist als Werkzeug, das nur von ExpertInnen mit entsprechendem baubetrieblichem und bauwirtschaftlichem Sachverstand sinnvoll eingesetzt werden kann, zu verstehen. Der Mensch steht damit auch weiterhin im Zentrum baubetrieblicher und bauwirtschaftlicher Entscheidungen und Handlungen, kann diese aber auf ein stabileres und aussagekräftigeres Fundament stellen.

## 10 Literaturverzeichnis

Das Literaturverzeichnis ist in folgende Abschnitte unterteilt:

- Bücher/Buchkapitel
- Masterarbeiten/Diplomarbeiten und Dissertationen
- Zeitschriften- und Fachartikel
- Tagungs-, Kongress und Festschriften
- Vorträge, Präsentationen, Workshop- und Vorlesungsunterlagen
- Regelwerke, Normen, Leitfäden
- Anwenderinformationen
- Internetquellen
- Literaturquellen für die Auswertungen in R

### 10.1 Bücher/Buchkapitel

Bartsch, Hans-Jochen: Taschenbuch Mathematischer Formeln – 20. Auflage. München, Wien. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004. (ISBN 3-446-22891-8)

Berg, Gerhard: REFA in der Baupraxis – Teil 1 Grundlagen. Hrsg.: REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. Frankfurt am Main. ztv-Verlag, 1984. (ISBN 3-923597-12-6)

Biermann, Bernd; Grosser, Karin: Taschenlexikon Finanzmathematik/ Statistik. Hrsg.: Eller, Roland. Stuttgart. Schäffer-Poeschel Verlag, 1999. (ISBN 3-7910-1462-5)

Blecken, Udo; Meinen, Heiko; Sundermeier, Matthias: Immobilien-Projektentwicklung – Quantitative Ökonomische Modelle – 1. Auflage. Schriftenreihe des Lehrstuhls Baubetrieb und Bauprozessmanagement der Technischen Universität Dortmund – Band 3. Hrsg.: Gralla, Mike. Dortmund. Werner Verlag und DVP-Verlag, 2012. (ISBN Werner Verlag: 978-3-8041-4520-7; ISBN DVP-Verlag: 978-3-937130-36-1)

Bleymüller, Josef: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler – WiSt Studienkurs – 16. Auflage. München. Verlag Franz Vahlen, 2012. (ISBN 978-3-8006-4294-6)

Bortz, Jürgen; Schuster, Christof: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler – 7. Auflage. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2010. (ISBN 978-3-642-12770-0 – eBook)

BROCKHAUS GmbH: Brockhaus in fünfzehn Bänden – Band 1 – A-Bau. Leipzig, Mannheim. F.A. Brockhaus GmbH, 1999.

BROCKHAUS GmbH: Brockhaus in fünfzehn Bänden – Band 3 – ChI-Eir. Leipzig, Mannheim. F.A. Brockhaus GmbH, 1999.

BROCKHAUS GmbH: Brockhaus in fünfzehn Bänden – Band 11 – Pfe-Rog. Leipzig, Mannheim. F.A. Brockhaus GmbH, 1999.

- Brücher, Heide: Leitfaden Wissensmanagement – Von der Anforderungsanalyse bis zur Einführung. Zürich. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2004. (ISBN 3-7281-2912-7)
- Burkhardt, Georg: Kostenprobleme der Bauproduktion. Schriftenreihe des Bayerischen Bauindustrieverbandes Nr. 3. Wiesbaden, Berlin. Bauverlag, 1963.
- Burkhardt, Georg; Pusch Wolfgang: Die Maschinisierung, ihr Maß und einige Konsequenzen für größere Baustellen. In: Neue Wege der Baubetriebsführung. Schriftenreihe Baubetrieb und Bauwirtschaft. Hrsg.: Küppers, Theo. Seite 17-32. Wiesbaden, Berlin. Bauverlag GmbH, 1960.
- Czado, Claudia; Schmidt, Thorsten: Mathematische Statistik – Statistik und Ihre Anwendungen. Hrsg.: Dette, Holger; Härdle, Wolfgang. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2011. (ISBN 978-3-642-17261-8 – eBook)
- Dellmann, Klaus; Pedell, Karl Ludwig: Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. Stuttgart. Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft, Steuer, Recht GmbH, 1994. (ISBN 3-7910-0785-8)
- DeMarco, Tom; Lister, Timothy: Bärenango – Mit Risikomanagement Projekte zum Erfolg führen. München, Wien. Carl Hanser Verlag, 2003. (ISBN 3-446-22333-9)
- Diekmann, Andreas: Empirische Sozialforschung – Grundlagen, Methoden, Anwendungen. Hrsg.: König, Burghard. Reinbek bei Hamburg. Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, 2007. (ISBN 978-3-499-55678-4)
- Drees, Gerhard; Spranz, Dieter: Handbuch der Arbeitsvorbereitung in Bauunternehmen. Wiesbaden, Berlin. Bauverlag GmbH, 1976. (ISBN 3-7625-0597-7)
- Flyvbjerg, Bent; Bruzelius, Nils; Rothengatter, Werner: Megaprojects and Risk – An Anatomy of Ambition. Cambridge. Cambridge University Press, 2005. (ISBN 0-521-00946-4)
- Gigerenzer, Gerd: Risiko – Wie man die richtigen Entscheidungen trifft – 3. Auflage. München. C.Bertelsmann Verlag, 2013. (ISBN 978-3-570-10103-2)
- Gigerenzer, Gerd; Gaissmaier, Wolfgang: Denken und Urteilen unter Unsicherheit: Kognitive Heuristiken. In: Enzyklopädie der Psychologie – Denken und Problemlösen – Kognition 8. Seite 330-366. Hrsg.: Funke, Joachim. Göttingen, Bern, Wien, Toronto, Seattle, Oxford, Prag. Hogrefe Verlag GmbH & Co. KG, 2006.  
(ISBN-10: 3-8017-0527-7; ISBN-13:978-3-8017-0527-5; Online unter: [https://www.researchgate.net/profile/Wolfgang\\_Gaissmaier/publication/242496195\\_Denken\\_und\\_Urteilen\\_unter\\_Unsicherheit\\_Kognitive\\_Heuristiken/links/0deec528dc5b10f999000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Wolfgang_Gaissmaier/publication/242496195_Denken_und_Urteilen_unter_Unsicherheit_Kognitive_Heuristiken/links/0deec528dc5b10f999000000.pdf). Datum des Zugriffs: 20.05.2015)
- Girmscheid, Gerhard: Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften – 2. Auflage. Zürich. Eigenverlag des IBB an der ETH Zürich, 2007. (ISBN 978-3-906800-10-3)
- Girmscheid, Gerhard; Busch, Thorsten A.: Projektrisikomanagement in der Bauwirtschaft. Berlin. Bauwerk Verlag GmbH, 2008. (ISBN 978-3-89932-183-8)

- Girmscheid, Gerhard; Busch, Thorsten A.: Unternehmensrisikomanagement in der Bauwirtschaft. Berlin. Bauwerk Verlag GmbH, 2008. (ISBN 978-3-89932-184-5)
- Girmscheid, Gerhard; Motzko, Christoph: Kalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen – Grundlagen, Methodik und Organisation. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2007. (ISBN 978-3-540-36694-2)
- Girmscheid, Gerhard; Motzko, Christoph: Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft – Produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung – 2. Auflage. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2013. (ISBN 978-3-642-36637-6 – eBook)
- Gladen, Werner: Performance Measurement – Controlling mit Kennzahlen – 6. Auflage. Wiesbaden. Springer Gabler Verlag, 2014. (ISBN 978-3-658-05138-9 – eBook)
- Gläser, Jochen; Laudel, Grit: Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen – Lehrbuch – 4. Auflage. Wiesbaden. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Springer Fachmedien GmbH, 2010. (ISBN 978-3-531-17238-5)
- Gleißner, Werner: Grundlagen des Risikomanagements im Unternehmen – Controlling, Unternehmensstrategie und wertorientiertes Management – 2. Auflage. München. Verlag Franz Vahlen, 2011. (ISBN 978-3-8006-3767-6)
- Golenko, D. I.: Statistische Methoden der Netzplantechnik. Stuttgart, Leipzig. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1972. (ISBN 3-519-02013-0)
- Gorden, Raymond L.: Interviewing – Strategy, Techniques, and Tactics. Homewood, Illinois. The Dorsey Press, 1969.
- Gottschalk-Mazouz, Niels: Risiko. In: Handbuch Ethik. Hrsg.: Düwell, Marcus; Hübenthal, Christoph; Werner, Micha H. Stuttgart, Weimar. Metzler-Verlag, 2011. (ISBN 978-3-476-02388-9)
- Greune, Steffen: Darstellung und Bewertung von Produktivitätsminderungen bei multiplen Bauablaufstörungen. Schriftenreihe des Instituts für Bauwirtschaft und Baubetrieb der Technischen Universität Braunschweig – Heft 55. Hrsg.: Wanninger, Rainer. Braunschweig. Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb der Technischen Universität Braunschweig, 2014. (ISBN 978-3-936214-23-9)
- Haberfellner, Rainhard et al.: Systems Engineering – Methodik und Praxis – 11. Auflage. Hrsg.: Daenzer, Walter; Huber, Fritz. Zürich. Verlag Industrielle Organisation, 2002. (ISBN 3-85743-998-X)
- Hengartner, Walter; Theodorescu, Radu: Einführung in die Monte-Carlo-Methode. München, Wien. Carl Hanser Verlag, 1978. (ISBN 3-446-12331-8)
- Henze, Norbert. Stochastik für Einsteiger – Eine Einführung in die faszinierende Welt des Zufalls – 9. Auflage. Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. (ISBN 978-3-8348-1845-4)
- Historisches Wörterbuch der Philosophie – Band 1: A-C. Hrsg.: Ritter, Joachim. Basel, Stuttgart. Schwabe & Co Verlag, 1971. (ISBN 3-7965-0115-X)

- Historisches Wörterbuch der Philosophie – Band 2: D-F. Hrsg.: Ritter, Joachim. Basel, Stuttgart. Schwabe & Co Verlag, 1972. (ISBN 3-7965-0115-X)
- Historisches Wörterbuch der Philosophie – Band 7: P-Q. Hrsg.: Ritter, Joachim; Gründer, Karlfried. Basel, Stuttgart. Schwabe & Co Verlag, 1989. (ISBN 3-7965-0115-X)
- Hoffmann, Friedrich; Motzko, Christoph; Corsten, Bernhard: Aufwand und Kosten zeitgemäßer Schalverfahren – 3. Auflage. Neu-Isenburg. Zeittechnik-Verlag GmbH, 2012. (ISBN 978 3- 939216-11-7)
- Hofstadler, Christian: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2007. (ISBN-13 978-3-540-34320-2)
- Hofstadler, Christian: Schalarbeiten – Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2008. (ISBN 978-3-540-85178-3)
- Hofstadler, Christian: Produktivität im Baubetrieb – Bauablaufstörungen und Produktivitätsverluste. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2014. (ISBN 978-3-642-41632-3)
- Hofstadler, Christian; Franzl, Gerald: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. Hrsg.: Verband Österreichischer Biege- und Verlegetechnik (VÖBV). 2011. (ISBN 978-3-200-02149-5)
- Hofmann, Martin; Pacyna, Heiko: Lösung ingenieurtechnischer Aufgaben durch Anwendung der multiplen, nicht-linearen Einflußgrößenrechnung. Darmstadt. REFA-Verlag, 1997.
- Holler, Manfred J.; Illing, Gerhard: Einführung in die Spieltheorie – 6. Auflage. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2006. (ISBN-13 978-3-540-27880-1)
- Huber, Peter J.; Ronchetti, Elvezio M.: Robust Statistics – 2. Auflage. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, Inc. 2009. (ISBN 978-0-470-12990-6)
- Hutzelmeyer, Hannes: Die Kostensteuerung des Bauauftraggebers. In: Praxis-Kompodium Baubetrieb –Leitfaden, Arbeitsunterlagen und Nachschlagewerk für Praktiker und Studenten – Band 2. Hrsg.: Schub, A.; Meyran, G. Seite 37-79. Wiesbaden, Berlin. Bauverlag GmbH, 1984. (ISBN 3-7625-2163-8)
- Iwan, Gerhard: Beitrag zur Anwendung der Simulation und Reihenfolgeoptimierung bei der Analyse von Bauproduktionsprozessen. Fortschrittsberichte VDI – Reihe 4: Bauingenieurwesen, Nr. 113. Düsseldorf. VDI-Verlag, 1992. (ISBN 3-18-141304-6)
- Jockisch, Maike; Rosendahl, Jens: Klassifikation von Modellen. In: „Das ist gar kein Modell!“ – Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Hrsg.: Bandow, Gerhard; Holzmüller, Hartmut H. Seite 23-52. Wiesbaden. Gabler, GWV Fachverlage GmbH, 2010. (ISBN 978-3-8349-1842-0)
- Jonen, Andreas: Semantische Analyse des Risikobegriffs – Strukturierung der betriebswirtschaftlichen Risikodefinitionen und literaturempirische Auswertung – Beiträge zur Controlling-Forschung – Nr. 11 – 2. Auflage. Hrsg.: Lingnau, Volker. Lehrstuhl für Unternehmenrechnung und Controlling der Technischen Universität Kaiserslautern, 08/2007. (ISSN 1612-3875)

- Knight, Frank Hyneman: Risk, Uncertainty and Profit. Chicago, London. University of Chicago Press, 1971. (ISBN 0-226-44690-5)
- Knorrenschild, Michael: Numerische Mathematik – Eine beispielorientierte Einführung – 5. Auflage. Hrsg.: Engelmann, Bernd. München. Carl Hanser Verlag, 2013. (ISBN 978-3-446-43389-2 eBook)
- Kochendörfer, Bernd: Bauzeit und Baukosten von Hochbauten. Schriftenreihe des Instituts für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart (TH) – Nr. 18. Hrsg.: Drees, Gerhard. Wiesbaden, Berlin. Bauverlag GmbH, 1978. (ISBN 3-7625-0938-7)
- Künstner, Gerhard: REFA in der Baupraxis – Teil 2 Datenermittlung. Hrsg.: REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. Frankfurt am Main. ztv-Verlag, 1984. (ISBN 3-923597-12-6)
- Lang, Andreas: Ein Verfahren zur Bewertung von Bauablaufstörungen und zur Projektsteuerung. Fortschrittsberichte VDI – Reihe 4: Bauingenieurwesen, Nr. 85. Düsseldorf. VDI-Verlag, 1988. (ISBN 3-18-148504-7)
- Laux, Helmut; Gillenkirch, Robert M.; Schenk-Mathes, Heike Y.: Entscheidungstheorie – 8. Auflage. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag, 2012. (ISBN 978-3-642-23511-5 – eBook)
- Lechner, Hans: Kostenplanung, Normen, Regelwerke – Projektmanagement in der Bau- und Immobilienwirtschaft – Bauprojektmanagement LEVEL D – 1. Auflage. Hrsg.: Lechner, Hans; Heck, Detlef. Graz. Verlag der Technischen Universität Graz, 2010. (ISBN 978-3-85125-099-2)
- Lechner, Hans: Wörterbuch (dt./engl.) BauProjektManagement – 3. Auflage. Hrsg.: Lechner, Hans; Heck, Detlef. Graz. Verlag der Technischen Universität Graz, 2011. (ISBN 978-3-85125-148-7)
- Lechner, Hans; Stifter, Daniela: Kommentar zu Leistungsbild Architektur – HOAI 2013 – LM.VM.2014 – 3. Auflage. Graz. Verlag der Technischen Universität Graz, 2015 (ISBN 978-3-85125-375-7)
- Luhmann, Niklas: Soziologie des Risikos. Berlin, New York. Walter de Gruyter Verlag, 1991. (ISBN 3-11-012939-6)
- Oberndorfer, Wolfgang; Jodl, Hans Georg et al.: Handwörterbuch der Bauwirtschaft – ON V 208 – 2. Auflage. Wien. ON Österreichisches Normungsinstitut, 2001. (ISBN 3-85402-072-4)
- Oepen, Ralf-Peter et al.: Risikoorientierte Bauprojekt-Kalkulation – Eine innovative Methode zur Risikobeherrschung und Eindämmung von Ausreißer-Projekten. Hrsg.: BRZ Deutschland GmbH. Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. (ISBN 978-3-8348-1892-8).
- Popper, Karl Raimund: Alles Leben ist Problemlösen – Über Erkenntnis, Geschichte und Politik – 15. Auflage. München. Piper Verlag GmbH, 2012. (ISBN 978-3-492-22300-3)
- Raaber, Norbert. (Beitrag zu Ausschreibung und Vergabe von Bauleistungen. Schriftenreihe des Instituts für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Graz – Heft 15. Hrsg.: Stadler, Gert. Graz. Verlag der Technischen Universität Graz, 2003. (ISBN 3-901351-76-0)
- Rafferty, John: Risk Analysis – In Project Management. London, New York. E & FN Spon, an Imprint of Routledge, 1999. (ISBN 0-419-18420-1)

- Sachs, Lothar: Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden – 11. Auflage. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2004. (ISBN 978-3-662-05744-5)
- Sachs, Lothar; Hedderich, Jürgen: Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R – 12. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York. Springer Verlag, 2006. (ISBN 978-3-540-32160-6)
- Sachs, Michael: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik für Ingenieurstudenten an Fachhochschulen – 4. Auflage. Hrsg.: Engelmann, Bernd. München. Carl Hanser Verlag, 2013. (ISBN 978-3-446-43732-6 – eBook)
- Sander, Philip; Spiegl, Markus; Schneider, Eckart: Die exakte Zahl – Gedanken zum Umgang mit Unschärfen. In: Die Wirtschaftliche Seite des Bauens – Festschrift zum 60. Geburtstag von Rainer Wanninger. Hrsg.: Wanninger, Rainer. Braunschweig. Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb der Technischen Universität Braunschweig, 2010.
- Schach, Rainer; Flemming, Christian: Grundlagen der Kostensimulation unter Einbeziehung von Risiken. In: Informationssysteme im Bauwesen 2 – Anwendungen. Hrsg.: Scherer, Rainer J.; Schapke, Sven-Eric. Seite 253-267. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2014. (ISBN 978-3-662-44760-4 – eBook)
- Schmidt, Heinrich Th.: Grundlagen der Baubetriebslehre. Wiesbaden, Berlin. Bauverlag GmbH und Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1977. (ISBN Bauverlag 3-7625-0822-4; ISBN Müller 3-481-17421-7)
- Schubert, Eberhard: Die Erfäßbarkeit des Risikos der Bauunternehmung bei Angebot und Abwicklung einer Baumaßnahme – Heft 7. Hrsg.: Jebe, Hans. Lehrstuhl für Baubetrieb und Baubetriebswirtschaft der Technischen Universität Hannover. Düsseldorf. Werner-Verlag, 1971. (ISBN 3-8041-3303-7)
- Schulz, Josef: Risikorechnung bei der Preiskalkulation – Ein Weg zur Ermittlung der maximalen Überschreitung von Kostenvoranschlägen. Wiesbaden, Berlin. Bauverlag GmbH, 1980. (ISBN 3-7625-1303-1)
- Silver, Nate: Die Berechnung der Zukunft – Warum die meisten Prognosen falsch sind und manche trotzdem zutreffen. München. Wilhelm Heyne Verlag, 2013. (ISBN 978-3-453-20048-7)
- Spranz, Dieter: Arbeitszeiten im Baubetrieb – Ermittlung und Anwendung bei Kalkulation, Arbeitsvorbereitung und Leistungsentlohnung – Eine Genauigkeits- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Schriftenreihe des Instituts für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart (TH) – Nr. 13. Hrsg.: Drees, Gerhard. Wiesbaden, Berlin. Bauverlag GmbH, 1975. (ISBN 3-7625-0570-5)
- Stempkowski, Rainer; Waldauer, Evelin: Risikomanagement Bau – Methoden und Erfahrungen bei der praktischen Umsetzung von Risiko- und Chancenmanagement bei Bauprojekten. Wien. Netzwerk – Der Verlag, 2013. (ISBN 978-3-902918-00-0)
- Stowasser, Joseph M. et al.: Stowasser – Lateinisch - deutsches Schulwörterbuch. Wien, München. Verlag Holder-Pichler-Tempsky und R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1998. (ISBN Verlag Holder-Pichler-Tempsky 3-209-01495-7; ISBN R. Oldenbourg Verlag 3-486-13405-1)



- Suhl, Leena; Mellouli,, Taieb: Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen – 3. Auflage. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2013. (ISBN 978-3-642-38936-8)
- Taleb, Nassim Nicholas: The Black Swan – The Impact of the Highly Improbable. New York. Random House, 2007. (ISBN 978-1-4000-6351-2)
- Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre – Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht – 7. Auflage. Wiesbaden. Springer Gabler Verlag, 2012. (ISBN 978-3-8349-3844-2 – eBook)
- Töllner, Alke et al.: Modelle und Modellierung – Terminologie, Funktionen und Nutzung. In: „Das ist gar kein Modell!“ – Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Hrsg.: Bandow, Gerhard; Holzmüller, Hartmut H. Seite 3-21. Wiesbaden. Gabler, GWV Fachverlage GmbH, 2010. (ISBN 978-3-8349-1842-0)
- Tukey, John W.: Exploratory Data Analysis. Reading – Massachusetts, Menlo Park – California, London, Amsterdam, Don Mills – Ontario, Sydney. Addison-Wesley Publishing Company, 1977. (ISBN 0-201-07616-0)
- Ulrich, Hans: Von der Betriebswirtschaftslehre zur systemorientierten Managementlehre. In: BWL als Management- und Führungslehre – 3. Auflage. Hrsg.: Wunderer, Rolf. Seite 161-178. Stuttgart. Schäffer-Poeschel Verlag, 1995. (ISBN 3-7910-0841-2)
- Volkman, Walter: Projektabwicklung für Architekten und Ingenieure – Handbuch für die planerische und baupraktische Umsetzung – Methoden, Arbeitshilfen, Vordrucke – 2. Auflage. Essen. Verlag für Wirtschaft und Verwaltung Hubert Wingen GmbH + Co., 2003. (ISBN 3-8028-0513-5)
- Vose, David: Risk Analysis – A quantitative guide – 3. Edition. Chichester. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. (ISBN 978-0-470-51284-5)
- Wenzel, Sigrid et al.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktions und Logistik – Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2008. (ISBN 978-3-540-35276-1 – eBook)
- Wolkerstorfer, Herbert; Lang, Christian: Praktische Baukalkulation – Erstellen der Kalkulationsformblätter gemäß ÖNORM B 2061 – 4. Auflage. Wien. Linde Verlag Ges.m.b.H., 2014. (ISBN 978-3-7073-1971-2)
- Yoe, Charles: Primer on Risk Analysis – Decision Making under Uncertainty. Boca Raton, London, New York. CRC Press – Taylor & Francis Group, 2012. (ISBN 978-1-4398-5763-2)

## 10.2 Masterarbeiten/Diplomarbeiten und Dissertationen

- Alber, Alexander: Risikomanagement in Bauunternehmen – Eine Analyse von Theorie und Praxis. Masterarbeit. Graz. Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Graz, 2013.
- Busch, Thorsten Alexander: Holistisches und probabilistisches Risikomanagement-Prozessmodell für projektorientierte Unternehmen der Bauwirtschaft. Dissertation. Zürich. Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich, 2005. (ISBN 3-906800-05-9)

- Demmler, Markus: Risikomanagement im internationalen Tunnelbau unter Anwendung der Vertragsform FIDIC Red Book. Dissertation. Darmstadt. Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt, 2009. (ISBN 978-3-00-027533-3)
- Dinort, Günter: Berücksichtigung stochastischer Einflüsse in der Kostenrechnung einer Bauunternehmung. Dissertation. München. Lehrstuhl für Tunnelbau und Baubetriebslehre der Technischen Universität München, 1977.
- Feik, Roland: Elektronisch gestütztes Risikomanagement im Bauwesen – Ein Konzept eines elektronischen Chancen- und Gefahrenmanagementsystems für Auftraggeber. Dissertation. Innsbruck. Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der Leopold-Franzens Universität Innsbruck, 2006.
- Hruschka, Johann: Die Anwendung des Normprodukts in der Baubetriebsplanung, Erläutert am Beispiel der Rohbauarbeiten im Hochbau. Dissertation. München. Fakultät für Bauwesen der Technischen Hochschule München, 1968.
- Krempf, Simone: Korrelationen bei Aufwandswerten für Schal- und Bewehrungsarbeiten. Masterarbeit. Graz. Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Graz, 2012.
- Kummer, Markus: Einsatz der Monte-Carlo Simulation zur Berechnung von Baukosten und Bauzeit. Masterarbeit. Graz. Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Graz, 2012.
- Lederer, Siegfried: Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung. Dissertation. Institut für Bauingenieurwesen IV Tunnelbau und Baubetriebslehre der Technischen Universität München, 1982.
- Liberda, Walter: Ermittlung des Kalkulationswagnisses im Bauwesen durch stochastische Berechnung der Herstellkosten. Dissertation. Graz. Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Graz, Erzherzog-Johann-Universität, 1985.
- Link, Doris: Risikobewertung von Bauprozessen – Modell ROAD – Risk and Opportunity Analysis Device. Dissertation. Wien. Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Wien, 1999.
- Mayer, Franz Xaver: Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung – Entwicklung eines Kosten-Prognose-Modells für Bauwerkskosten im Hochbau. Dissertation. München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung der Technischen Universität München, 2013.
- Naumann, René: Kosten-Risiko-Analyse für Verkehrsinfrastrukturprojekte. Aus Forschung und Praxis – Band 8 – Schriftenreihe des Instituts für Baubetriebswesen der Technischen Universität Dresden. Hrsg.: Schach, Rainer. Dresden. Expert Verlag, 2007. (ISBN-13: 978-3-8169-2701-3)
- Rohr, Stefan: Optimierung der Bauproduktion durch Simulation von Prozessen. Dissertation. München. Institut für Geologie, Geotechnik und Baubetrieb der Technischen Universität München, 2005.

- Sander, Philip: Probabilistische Risiko-Analyse für Bauprojekte – Entwicklung eines branchenorientierten softwaregestützten Risiko-Analyse-Systems. Dissertation. Innsbruck. Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2012.
- Schlagbauer, Dieter: Entscheidungsgrundlagen für die Arbeitszeitgestaltung – Entwicklung einer Systematik zur Vorhersage des Leistungsrückgangs auf Basis physiologischer Grundlagen und Darstellung der Anwendung im Mauerwerksbau. Dissertation. Graz. Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Graz, 2011.
- Strehl, Gustav: Ein Modell für die Ermittlung eines Angebotspreises von Bauleistungen bei stochastischer Kostenermittlung. Dissertation. Wien. Technische Universität Wien, 1983.
- Wallner, Maria: Risikomanagementsysteme für den Bauherrn. Diplomarbeit. Graz. FH JOANNEUM Gesellschaft mbH 2004.
- Werkl, Michael: Risiko- und Nutzenverhalten in der Bauwirtschaft – Eine entscheidungstheoretische Betrachtung im institutionenökonomischen Kontext. Dissertation. Graz. Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Graz, 2013.
- Werner, Andreas: Datenbankgestützte Risikoanalyse von Bauprojekten – Eine Methode zur rechnergestützten Monte-Carlo-Simulation des Bauablaufes für die Risikoanalyse im Bauunternehmen. Dissertation. Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Rostock, 2002.
- Wiggert, Marcel: Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen. Dissertation. Graz. Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Graz, 2009.

### 10.3 Zeitschriften- und Fachartikel

- AbouRizk Simaan M., Halpin Daniel W.: Statistical Properties of Construction Duration Data. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 118, No. 3, September 1992. S. 525-544. American Society of Civil Engineers (ASCE), 1992. (ISSN 0733-9364)
- Analytical Methods Committee. Robust statistics: a method of coping with outliers – amc technical brief, Royal Society of Chemistry, 2001. (Online unter: [http://www.rsc.org/images/robust-statistics-technical-brief-6\\_tcm18-214850.pdf](http://www.rsc.org/images/robust-statistics-technical-brief-6_tcm18-214850.pdf). Datum des Zugriffs: 07.10.2015)
- Blecken, Udo: Die Produktions- und Kostentheorie im instationären Baubetrieb. In: Der Baubetriebsberater, Heft 4, 1/1976. Seite 199-210. Wiesbaden, Berlin. Bau-Verlag, 1976.
- Boeckelmann, Lukas; Mildner, Stormy-Annika: Unsicherheit, Ungewissheit, Risiko – Die aktuelle wissenschaftliche Diskussion über die Bestimmung von Risiken. In: SWP-Zeitschriftenschau 2. Stiftung Wissenschaft und Politik – Deutsches Institut für Internationale Politik und Sicherheit. Berlin. Stiftung Wissenschaft und Politik, September 2011. (ISSN 1611-6380; Online unter: [http://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/zeitschriftenschau/2011zs02\\_bkm\\_mdn\\_ks.pdf](http://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/zeitschriftenschau/2011zs02_bkm_mdn_ks.pdf). Datum des Zugriffs: 03.10.2013)

- Chau, Kwong Wing (1995a): The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. In: *Construction Management and Economics*, Volume 13, Issue 1, 1995. Seite 15-21. London. Taylor & Francis Group, 1995. (ISSN 0144-6193)
- Chau, Kwong Wing (1995b): Monte Carlo simulation of construction cost using subjective data. In: *Construction Management and Economics*, Volume 13, Issue 5, 1995. 13, Seite 369-383. London. Taylor & Francis Group, 1995. (ISSN 0144-6193)
- Daszykowski, M.; et al.: Robust statistics in data analysis – A review Basic concepts. In: *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 85, 2007. Seite 203-219. Elsevier B.V. (ISSN 0169-7439)
- Domschek, Wolfgang; Scholl, Armin: Heuristische Verfahren. In: *Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft – Arbeits- und Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena*, 08/2006. Jena. Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2006. (ISSN 1611-1311; Online unter: <http://www.wiwi.uni-jena.de/papers/wp-sw0806.pdf>. Datum des Zugriffs: 25.03.2014)
- Flemming, Christian; Netzker, Markus; Schöttle, Annett: Probabilistische Berücksichtigung von Kosten- und Mengenrisiken in der Angebotskalkulation. In: *Bautechnik* 88 (2011), Heft 2, Seite 94-101. Berlin, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2011.
- Hintze, Jerry L.; Nelson, Ray D.: Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism. In: *The American Statistician*, Vol. 52, No. 2. Seite 181-184. An Official Journal of the American Statistical Association. Taylor & Francis, 1998. (ISSN 0003-1305; Online 1537-2731)
- Hofstadler, Christian: Monte-Carlo-Simulation im Baubetrieb – Verteilungsfunktion für Aufwandswerte bei Schalarbeiten – Herleitung der Verteilungsfunktion aus den Ergebnissen einer Expertenbefragung. In: *Bauingenieur*, Band 89, Mai 2014. Seite 189-201. Düsseldorf. Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2014. (ISSN 0005-6650)
- Hürlimann, Roland; Bucher, Jörg: Bauzeit und Bauablauf im schweizerischen Baurecht. In: *bau aktuell*, 1. Jahrgang, Heft Nr. 1, Jänner 2010. Seite 10-15. Wien, Linde-Verlag Ges.m.b.H., 2010. (ISSN 2077-4737)
- Kaplan, Stanley; Garrick, John: On The Quantitative Definition of Risk. In: *Risk Analysis* Vol. 1, No. 1. Seite 11-27. Society of Risk Analysis, 1981.
- Kummer, Markus; Hofstadler, Christian: Einsatz der Monte-Carlo-Simulation zur Berechnung von Baukosten. In: *bau aktuell*, 4. Jahrgang, Heft Nr. 5, September 2013. Seite 178-188. Wien, Linde-Verlag Ges.m.b.H., 2013. (ISSN 2077-4737)
- Motzko, Christoph; Boska Erik: Ermittlung von Aufwandswerten bei Schalungsarbeiten im Sichtbetonbereich. In: *BauPortal – Fachzeitschrift der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft*, 3/2013. Seite 18-24. Berlin, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, 2013. (ISSN 1866-0207)

- Oberndorfer, Wolfgang: Ein Beitrag zu den Grundlagen der Baupreisbildung. In: bau aktuell, 1. Jahrgang, Heft Nr. 5, September 2010. Seite 190-196. Wien, Linde-Verlag Ges.m.b.H., 2010. (ISSN 2077-4737)
- Riediger, Hans-Georg; Steinmetzger, Rolf: Rationalisierung im Baubetrieb: Möglichkeiten der REFA-Methodenlehre. In: Thesis – Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar, 46(2000)1, Seite 38–50. Weimar, 2000. (Manuskript online unter: [https://www.uni-weimar.de/fileadmin/user/fak/bauing/professuren\\_institute/Baubetrieb\\_und\\_Bauverfahren/Personen/Prof\\_Steinmetzger/Veroeffentlichungen/Stm\\_Ried\\_REFA-Bau\\_Thesis\\_1-2000.pdf](https://www.uni-weimar.de/fileadmin/user/fak/bauing/professuren_institute/Baubetrieb_und_Bauverfahren/Personen/Prof_Steinmetzger/Veroeffentlichungen/Stm_Ried_REFA-Bau_Thesis_1-2000.pdf). Datum des Zugriffs: 12.06.2015)
- Rousseuw, Peter; Verboven, Sabine: Robust estimation in very small samples. In: Computational Statistics & Data Analysis, 40, 2002. Seite 741-758. Elsevier B.V. (ISSN 0167-9473)
- Schütz, Michael; Hofstadler, Christian: Anwendung des Systems Engineering auf die Arbeitsvorbereitung von Bauprojekten. In: Bautechnik 89 (2012), Heft 11, Seite 801-813. Berlin, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2012.
- Song, Lingguang; AbouRizk Simaan M.: Measuring and Modeling Labor Productivity Using Historical Data. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 134, No. 10, October 2008. S. 786-794. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2008. (ISSN 0733-9364)
- Taroun, A.; Yang, J.B.; Lowe, D.: Construction Risk Modelling and Assessment: Insights from a Literature Review. In: Journal of the Built and Human Environment Review, Volume 4, Special Issue 1. Seite 87-97. 2011. (Online unter: <http://www.tbher.org/index.php/tbher/article/view/46/47>. Datum des Zugriffs: 09.10.2014)
- Tautschnig, Arnold; Fröch, Georg; Sander, Philip: Erfahrungen mit probabilistischen Kostenermittlungen im Hochbau. In: bau aktuell, 1. Jahrgang, Heft Nr. 5, September 2010. Seite 211-216. Wien, Linde-Verlag Ges.m.b.H., 2010. (ISSN 2077-4737)
- Touran, Ali; Wisner, Edward P.: Monte Carlo Technique with Correlated Random Variables. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 118, No. 2, June 1992. S. 258-272. American Society of Civil Engineers (ASCE), 1992. (ISSN 0733-9364)
- Ulrich, Peter; Hill, Wilhelm: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). In: WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium – Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt. 5. Jahrgang, Heft 7, Seite 304-309, München. Beck Verlag, 1976.
- Watzlik, Laura; Hofstadler, Christian; Kummer, Markus: Modellbildung zur systematischen Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten und Forcierungsmaßnahmen in der Kalkulation. In: bau aktuell, 5. Jahrgang, Heft Nr. 6, November 2014. Seite 210-221. Wien, Linde-Verlag Ges.m.b.H., 2014. (ISSN 2077-4737)
- Yang, I.-T.: Simulation-based estimation for correlated cost elements. In: International Journal of Project Management, Volume 23, Issue 4, May 2005. Seite 275-282. Elsevier Ltd. and IPMA, 2005. (ISSN 0263-7863)

Zimmermann, Josef; Eber, Wolfgang; Tilke, Carsten: Unsicherheiten bei der Realisierung von Bauprojekten – Grenzen einer wahrscheinlichkeitsbasierten Risikoanalyse. In: Bauingenieur, Band 89, Juni 2014. Seite 272-282. Düsseldorf. Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2014. (ISSN 0005-6650)

#### 10.4 Tagungs- und Kongressschriften

Böhnlein, Claus-Burkard: Simulation in der Betriebswirtschaft. In: Experiences from the Future – New Methods and Applications in Simulation for Production and Logistics – Tagungsband 11. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin, 04.-05. Oktober 2004. Hrsg.: Mertins, Kai; Rabe, Markus. Seite 1-22. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2004. (ISBN 3-8167-6640-4)

Hofstadler, Christian: Berechnung der Bauzeit – Systematischer Umgang mit Projektunsicherheiten. In: Netzwerk Bau – Fachzeitschrift für Baumanagement und Bauwirtschaft – Nr. 15-011 – Wissen & Visionen – Chancen zur erfolgreichen Projektentwicklung erkennen und umsetzen – Fachsymposium 10 Jahre Netzwerk Bau – Tagungsband. Hrsg.: Stempkowski, Rainer. Seite 32-41. Perchtoldsdorf, Stempkowski Baumanagement & Bauwirtschaft Consulting GmbH, 2011.

Hofstadler, Christian; Kummer, Markus: Systematischer Umgang mit Produktivitätsrisiken in der Auftragskalkulation. In: Tagungsband – 12. Grazer Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium – Risiken im Bauvertrag – Baubetriebliche, bauwirtschaftliche und rechtliche Aspekte. Hrsg.: Heck, Detlef; Mauerhofer, Gottfried; Hofstadler, Christian. Seite 53-90. Graz, Verlag der Technischen Universität Graz, 2014. (ISBN 978-3-85125-312-2)

Hofstadler, Christian; Kummer, Markus: Risiken und Chancen der Mischpreiskalkulation. In: Tagungsband – 13. Grazer Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium – Preisermittlung und Vergabe in der Bauwirtschaft – Baubetriebliche, bauwirtschaftliche und rechtliche Aspekte. Hrsg.: Heck, Detlef; Mauerhofer, Gottfried; Hofstadler, Christian. Seite 49-92. Graz, Verlag der Technischen Universität Graz, 2015. (ISBN 978-3-85125-385-9)

Hofstadler, Christian; Kummer, Markus: Application of the Monte-Carlo Method to Calculate the Life-Cycle Costs of Bridges. In: Multi-Span Large Bridges. Hrsg.: Pacheco, Pedro; Magalhães, Filipe. London. CRC Press – Taylor & Francis Group, 2015. (ISBN 978-1-138-02757-2)

Kessoudis, Konstantinos: Mefisto aus Sicht des Auftragnehmers – Modellbasierte Projektabwicklung im Bauunternehmen. In: MEFISTO: Management – Führung – Information – Simulation im Bauwesen – Tagungsband 1. Mefisto Kongress – 21. Oktober 2010, Dresden – Veranstaltungen des Instituts für Bauinformatik – Heft 2. Hrsg.: Scherer, Raimar; Schapke, Sven-Eric. Seite 37-48. Dresden. Institut für Bauinformatik der Technischen Universität Dresden, 2010. (ISBN 978-3-86780-187-4)

- Kummer, Markus: Additive Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten. In: Tagungsband – 25. BBB-Assistententreffen in Graz – Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik. Hrsg.: Heck, Detlef; Mauerhofer, Gottfried; Hofstadler, Christian. Seite 171-186. Graz, Verlag der Technischen Universität Graz, 2014. (ISBN 978-3-85125-356-6)
- Kummer, Markus: Aggregierte Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten. In: Tagungsband – 26. BBB-Assistententreffen – Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Bereiche Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauverfahrenstechnik. Hrsg.: Berner, Fritz. Seite 167-183. Stuttgart, Institut für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart, 2015. (ISBN 978-3-9814355-7-3)
- Rockenschaub, Markus; Benque, Christian; Weinhandl, Robert: Reduzierung von Risiken durch ausgewogene Bauverträge bei Spitalsbauten. In: Tagungsband – 12. Grazer Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium – Risiken im Bauvertrag – Baubetriebliche, bauwirtschaftliche und rechtliche Aspekte. Hrsg.: Heck, Detlef; Mauerhofer, Gottfried; Hofstadler, Christian. Seite 33-52. Graz, Verlag der Technischen Universität Graz, 2014. (ISBN 978-3-85125-312-2)
- Schach, Rainer: Stochastische Investitionskostenberechnung für Verkehrsinfrastrukturprojekte. In: Tagungsband zur 5. Dresdner Fachtagung Transrapid am 29.09.2005. S. 107-125. Hrsg.: Schach, Rainer. Dresden. Verlag der Technischen Universität Dresden, 2005. (ISBN-13: 978-3860054901)
- Scherer, Raimar: Mefisto – Partnerschaftliche Nutzung von Multi-Modellinformationen zur Steuerung, Simulation und Führung von Bauprojekten. In: MEFISTO: Management – Führung – Information – Simulation im Bauwesen – Tagungsband 1. Mefisto Kongress – 21. Oktober 2010, Dresden – Veranstaltungen des Instituts für Bauinformatik – Heft 2. Hrsg.: Scherer, Raimar; Schapke, Sven-Eric. Seite 9-36. Dresden. Institut für Bauinformatik der Technischen Universität Dresden, 2010. (ISBN 978-3-86780-187-4)
- Xie, Hua; AbouRizk; Simaan; Fernando, Siri: Integrating Realtime Project Progress Input into a Construction Simulation Model. In: Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference – 11-14 December 2011. Hrsg.: Jain, S. et al. Seite 3448-3459. Phoenix, AZ. IEEE, 2011. (ISBN 978-1-4577-2107-6 – eBook)

### 10.5 Vorträge, Präsentationen, Workshop- und Vorlesungsunterlagen

- Hofstadler, Christian: Application of the Monte-Carlo Method to Determine the Costs for Construction Projects – Influence of Ranges and Correlations on Probability Distribution. Vortrag im Rahmen der Palisade 2011 Palisade Risk Conference – Risk Analysis, Applications & Training. Amsterdam, 2011.  
(Online unter: <http://www.palisade.com/downloads/UserConf/EU11/2011-Palisade@RISK-Hofstadler.pdf>. Datum des Zugriffs: 18.10.2012)

- Hofstadler, Christian: Risikofaktor Baugrund – Risikofaktoren aus technischer und stochastischer Sicht. Vortrag beim ZT-Forum. Graz, 2012.
- Hofstadler, Christian: Teil 1: Leistungsstörungen und Folgen für Produktivität sowie Kosten. FDBR-Workshop: „Nachträge und Leistungsstörungen – Rechtliche und wirtschaftliche Aspekte“. Düsseldorf, 2015.
- Köhler, Jochen: 2. Grundlagen Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Vorlesungsfolien. Seminar an der Technischen Universität Graz: „Risiko und Sicherheit im Bauwesen“. Graz, 2012.
- Lechner, Hans: Vergleichende Beurteilung von (Bau-) Kostenaussagen in frühen Planungsphasen. Präsentation. Graz. Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Graz, 17.04.2007.
- Liu, Qian: Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik für Bauingenieure. Skriptum. Graz. Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Graz, 2012.
- Motzko, Christoph; Westerkamp, Martin: Forschungsmethoden für Ingenieure – Methoden der Sozialforschung im Baubetrieb. Institut für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt. Vortrag vom 10. Juli 2014.
- Thompson, Michael: Statistics and Data Analysis in Proficiency Testing. AMC Presentation – Madrid. School of Biological and Chemical Sciences Birkbeck College – University of London. 2007. (Online unter: [http://www.rsc.org/images/madrid%202007\\_tcm18-87000.pdf](http://www.rsc.org/images/madrid%202007_tcm18-87000.pdf). Datum des Zugriffs: 07.10.2015)
- Universität Siegen: Vorlesungsfolien: „Marktforschung“ – Sommersemester 2011. (Online unter: <http://slideplayer.de/slide/644669/#>. Datum des Zugriffs: 03.12.2014)
- Voigt, Matthias: Grundlagen der Probabilistik. Vortrag im Zuge des 1. Dresdner Probabilistik-Workshops der Professur für Turbomaschinen und Strahlantriebe am Institut für Strömungsmechanik, Technische Universität Dresden, 09. bis 10. Oktober 2008. (Online unter: [http://www.probabilistik.de/vortrag/Vortrag0102\\_Voigt\\_TUD.pdf](http://www.probabilistik.de/vortrag/Vortrag0102_Voigt_TUD.pdf). Datum des Zugriffs: 07.05.2014)

## 10.6 Regelwerke, Normen, Leitfäden

- DIN 69901-5 (Ausgabe: Januar 2009) Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 5: Begriffe.
- DIN ISO 5725-1 (Ausgabe: November 1997) Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe.
- ÖNORM B 1801-1 (Ausgabe: 2009-06-01) Bauprojekt- und Objektmanagement – Teil 1: Objekterrichtung.
- ÖNORM DIN 69905 (Ausgabe: 2001-01-01) Projektwirtschaft – Projektentwicklung – Begriffe.



ONR 49000 (Ausgabe: 2014-01-01) Risikomanagement für Organisationen und Systeme – Begriffe und Grundlagen – Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis.

ÖNORM EN ISO 9000 (Ausgabe: 2005-12-01) Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe.

ÖNORM ISO 31000 (Ausgabe: 2010-02-01) Risikomanagement – Grundsätze und Richtlinien.

ÖNORM S 2410 (Ausgabe: 2010-01-01) Chancen- und Risikomanagement – Analyse und Maßnahmen zur Sicherung der Ziele von Organisationen.

## 10.7 Anwenderinformationen

Palisade Corporation: Benutzerhandbuch – @Risk – Risikoanalysen- und Simulations-Add-In für Microsoft Excel – Version 6. März 2013.

## 10.8 Internetquellen

Böhnlein, Claus-Burkard: Simulationsunterstützte Spezifikation und Analyse von Geschäftsmodellen und Geschäftsprozessen. 2010. (Online unter: [http://www.asim-fachtagung-spl.de/asim2010/papers/E9\\_Boehnlein.pdf](http://www.asim-fachtagung-spl.de/asim2010/papers/E9_Boehnlein.pdf). Datum des Zugriffs: 29.04.2015)

BusinessDictionary.com. WebFinance, Inc. <http://www.businessdictionary.com/definition/probabilistic.html>. Datum des Zugriffs: 07.05.2014.

Faes.de: <http://www.faes.de/Basis/Basis-Statistik/Basis-Statistik-Korrelation-Re/basis-statistik-korrelation-re.html>. Datum des Zugriffs: 10.12.2011.

Faes.de: <http://www.faes.de/Basis/Basis-Lexikon/Basis-Lexikon-Multivariate/Basis-Lexikon-Faktorenanalyse/basis-lexikon-faktorenanalyse.html>. Datum des Zugriffs: 10.12.2011.

Flyvbjerg, Bent; Budzier, Alexander: Berliner, so baut ihr richtig!. In: Zeit Online. 14.01.2013. (Online unter: <http://www.zeit.de/wirtschaft/2013-01/flughafen-berlin-debakel-grossbauprojekte-planungsforscher>. Datum des Zugriffs: 21.04.2013)

Foto John von Neumann:  
[http://de.wikipedia.org/wiki/John\\_von\\_Neumann#media-viewer/File:JohnvonNeumann-LosAlamos.gif](http://de.wikipedia.org/wiki/John_von_Neumann#media-viewer/File:JohnvonNeumann-LosAlamos.gif). Datum des Zugriffs: 26.11.2014.

Foto Stanislaw Ulam:  
[http://www.atomicarchive.com/History/hbomb/page\\_10.shtml](http://www.atomicarchive.com/History/hbomb/page_10.shtml). Datum des Zugriffs: 26.11.2014

Gaulhofer, Karl: Wenn Politiker zur Schaufel greifen. In: Die Presse. 12.01.2013. (Online unter: [http://diepresse.com/home/wirtschaft/international/1332085/Grossprojekte\\_Wenn-Politiker-zur-Schaukel-greifen](http://diepresse.com/home/wirtschaft/international/1332085/Grossprojekte_Wenn-Politiker-zur-Schaukel-greifen). Datum des Zugriffs: 13.01.2013)

- Gaulhofer, Karl: „Die öffentliche Hand ist nicht lernfähig“. In: Die Presse. 12.01.2013. (Online unter: <http://diepresse.com/home/wirtschaft/international/1332088/Die-offentliche-Hand-ist-nicht-lernfaehig>. Datum des Zugriffs: 13.01.2013)
- Hauwermeieren, Michael Van; Vose, David: A Compendium on Distributions. eBook. 2009. (Online unter: <http://www.vosesoftware.com/content/ebook.pdf>. Datum des Zugriffs: 21.01.2015)
- Horx Zukunftsinstitut GmbH: Prognose – Prophezeiung – Vision – Semantische Unterschiede von Zukunfts-Aussagen. 2010. (Online unter: <http://www.horx.com/Zukunftsforschung/Docs/01-G-09-Prognose-Vision-Prophezeiung.pdf>. Datum des Zugriffs: 28.07.2015)
- <http://www.sign-lang.uni-hamburg.de/projekte/slex/seitendvd/konzeptg/l52/l5255.htm>. Datum des Zugriffs: 02.06.2015.
- <http://paedpsych.jk.uni-linz.ac.at/INTERNET/ARBEITSBLAETTER/ERZIEHUNGSWISSENSCHAFT/ErzWissenschaftEmpirisch.html>. Datum des Zugriffs: 05.08.2015.
- KPMG: Integriertes Risikomanagement. Broschüre. Berlin. 1998. [Online nicht mehr verfügbar]
- Lohninger, Hans: Grundlagen der Statistik. Online unter: [http://www.statistics4u.info/fundstat\\_germ/cc\\_skewness.html](http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/cc_skewness.html). Datum des Zugriffs: 07.10.2015.
- <http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/~m-mat/MT/emt.html>. Datum des Zugriffs: 27.11.2014.
- Mattern, Friedmann: Modellbildung und Simulation. Fachbereich Informatik der Technischen Hochschule Darmstadt, 1996. (Online unter: [http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/Mod\\_Sim.pdf](http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/Mod_Sim.pdf). Datum des Zugriffs: 22.05.2015)
- MSC2010: <http://www.ams.org/mathscinet/msc/pdfs/classifications2010.pdf>. Datum des Zugriffs: 05.02.2015.
- National Hurricane Center: [http://www.nhc.noaa.gov/archive/2005/KATRINA\\_graphics.shtml](http://www.nhc.noaa.gov/archive/2005/KATRINA_graphics.shtml). Datum des Zugriffs: 19.10.2014.
- Palisade Corporation: 5.3. How @Risk Tests a Correlation Matrix for Validity. Palisade Knowledge Base. <http://kb.palisade.com/index.php?pg=kb.page&id=74>. Datum des Zugriffs: 16.05.2013.
- Raffel, Wolf-Ulrich: Simulationstheorie. Institut für Informatik der Freien Universität Berlin, 2001. (Online unter: <http://www.wuraffel.de/wissenschaft/publikationen/Simulationstheorie.pdf>. Datum des Zugriffs: 01.05.2015).
- REFA Bundesverbandes e.V., REFA-Lexikon, Stichwort: Rüstzeit. Online unter: <http://www.refa-lexikon.de/artikel/340/ruestzeit-tr>. Datum des Zugriffs: 26.06.2015.
- REFA Bundesverbandes e.V., REFA-Lexikon, Stichwort: Rüsten. Online unter: <http://www.refa-lexikon.de/artikel/338/ruesten>. Datum des Zugriffs: 26.06.2015.

- Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1999), Stichwort: Aggregation.  
 Online unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/aggregation/1481>.  
 Datum des Zugriffs: 02.09.2015
- Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort:  
 Aggregation. Online unter:  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55812/aggregation-v12.html>.  
 Datum des Zugriffs: 02.09.2015.
- Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort:  
 Beziehungszahl. Online unter:  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/6293/beziehungszahl-v9.html>.  
 Datum des Zugriffs: 03.06.2015.
- Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort:  
 Expertenwissen. Online unter:  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55229/expertenwissen-v9.html>.  
 Datum des Zugriffs: 20.10.2014.
- Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort:  
 Gliederungszahl. Online unter:  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/8084/gliederungszahl-v9.html>.  
 Datum des Zugriffs: 03.06.2015.
- Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort:  
 Messzahl. Online unter:  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/7736/messzahl-v9.html>. Datum  
 des Zugriffs: 03.06.2015.
- Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort:  
 Prognose. Online unter:  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/4546/prognose-v11.html>. Datum  
 des Zugriffs: 26.07.2015
- Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort:  
 Theorie des Reifegrades. Online unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/85846/theorie-des-reifegrades-v7.html>. Datum des  
 Zugriffs: 22.10.2015
- Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort:  
 Risiko. Online unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/6780/risiko-v10.html>. Datum des Zugriffs: 29.01.2013.
- Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort:  
 Ungewissheit. Online unter:  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55049/ungewissheit-v3.html>.  
 Datum des Zugriffs: 12.03.2013.
- Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort:  
 Unsicherheit. Online unter:  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/9325/unsicherheit-v11.html>.  
 Datum des Zugriffs: 12.03.2013.
- Statista – Das Statistik-Portal:  
<http://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/80/lageparameter/>. Datum  
 des Zugriffs: 24.08.2015.

Verkuil, Arie Hans; Dey, Pascal: Forschungsverständnis im Kontext anwendungsorientierter Wissenschaften (F&E). Brugg-Windisch. Institut für Unternehmensführung (IfU) der Fachhochschule Nordwestschweiz – Hochschule für Wirtschaft, 2010. (Online unter: <http://www.fhnw.ch/wirtschaft/ifu/forschung-und-entwicklung/grundlagenbericht-forschung>. Datum des Zugriffs: 20.06.2015)

ZAMG:

[http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten\\_oesterreich\\_1971\\_frame1.htm](http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm). Datum des Zugriffs: 20.08.2015

## 10.9 Literaturquellen für die Auswertungen in R

### Bücher

John, Fox; Sanford, Weisberg: An R Companion to Applied Regression, Second Edition. Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington DC. SAGE Publications Inc, 2011. (ISBN-13: 978-1412975148 – online unter: <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>)

Venables, W. N.; Ripley, B. D.: Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition. New York. Springer Verlag, 2002. (ISBN 978-0-387-21706-2)

Wickham, Hadley: ggplot2 – Elegant Graphics for Data Analysis. New York. Springer Verlag, 2009. (ISBN 9780387981413 oder 9780387981406)

### Verwendete Programmpakete

Frederick Novomestky (2012). matrixcalc: Collection of functions for matrix calculations. R package version 1.0-3. (<http://CRAN.R-project.org/package=matrixcalc>)

Hadley Wickham (2015). ggplot2: An Implementation of the Grammar of Graphics. R package version 1.0.1.9003@5f4af9 (<https://github.com/hadley/ggplot2>)

Hadley Wickham (2015). purrr: Functional Programming Tools. R package version 0.1.0.9000@6d57a8. (<https://github.com/hadley/purrr>)

Hadley Wickham (2015). readxl: Read Excel Files. R package version 0.1.0.9000@7c7f66b. (<https://github.com/hadley/readxl>)

Hadley Wickham (2015). scales: Scale Functions for Visualization. R package version 0.3.0. (<http://CRAN.R-project.org/package=scales>)

Hadley Wickham (2015). stringr: Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations. R package version 1.0.0. (<http://CRAN.R-project.org/package=stringr>)

Hadley Wickham (2015). tidyr: Easily Tidy Data with ‘spread()’ and ‘gather()’ Functions. R package version 0.3.1. (<http://CRAN.R-project.org/package=tidyr>)

Hadley Wickham and Romain Francois (2015). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 0.4.3. (<http://CRAN.R-project.org/package=dplyr>)

- Hadley Wickham and Romain Francois (2015). readr: Read Tabular Data. R package version 0.2.2. (<http://CRAN.R-project.org/package=readr>)
- John Fox and Sanford Weisberg (2015). car: Functions and Datasets to Accompany J. Fox and S. Weisberg, An R Companion to Applied Regression, Second Edition, Sage, 2011. R package version 2.1-0. (<http://CRAN.R-project.org/package=car>)
- R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (<http://www.R-project.org/>)
- Revelle, W. (2015). psych: Procedures for Personality and Psychological Research, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, version 1.5.8. (<http://CRAN.R-project.org/package=psych>)
- Venables, W. N. & Ripley, B. D. (2015). MASS: Functions and datasets to support Venables and Ripley, „Modern Applied Statistics with S“ (4th edition, 2002). R package version 7.3-44. (<http://CRAN.R-project.org/package=MASS>)



# Abkürzungsverzeichnis

Im folgenden Abschnitt sind die wesentlichsten Abkürzungen dargestellt.

## A

Abb.	.....	Abbildung(en)
AF <sub>MIN</sub>	.....	Mindestarbeitsfläche [m <sup>2</sup> /AK]
AF <sub>RED</sub>	.....	Arbeitsflächenreduktion
AF <sub>VOR</sub>	.....	vorhandene Arbeitsfläche [m <sup>2</sup> /AK]
AG	.....	Auftraggeber
AK	.....	Arbeitskraft/Arbeitskräfte
AK <sub>ANZ</sub>	.....	Anzahl der Arbeitskräfte
AK <sub>ERH</sub>	.....	Arbeitskräfteerhöhung
AK <sub>MW</sub>	.....	mittlere Arbeitskräfteanzahl
AK <sub>MAX</sub>	.....	maximale Arbeitskräfteanzahl
AK <sub>RED</sub>	.....	Arbeitskräftereduktion
AK <sub>STB,MAX</sub>	.....	maximale Anzahl der Arbeitskräfte für Stahlbetonarbeiten
AK <sub>STB,MW</sub>	.....	mittlere Anzahl der Arbeitskräfte für Stahlbetonarbeiten
AN	.....	Auftragnehmer
ANZ <sub>AK,OPT</sub>	.....	optimale Anzahl an Arbeitskräften
ANZ <sub>AK,VOR</sub>	.....	vorhandene Anzahl an Arbeitskräften
ANZ <sub>K,OPT</sub>	.....	optimale Anzahl an Kranen
ANZ <sub>K,VOR</sub>	.....	vorhandene Anzahl an Kranen
ANZ <sub>NEG,KORR</sub>	.....	Anzahl negativer Korrelationen
AW	.....	Aufwandswert [Std/MEH]
AW <sub>a,v,i</sub>	.....	Aufwandswert (a...Ablaufstufe, v...Vorgang, i...Bauteil)
AW <sub>BT</sub>	.....	Aufwandswert für das Betonieren [Std/m <sup>3</sup> ]
AW <sub>BT,MW</sub>	.....	mittlerer Aufwandswert für das Betonieren [Std/m <sup>3</sup> ]
AW <sub>BW</sub>	.....	Aufwandswert für das Bewehren [Std/t]
AW <sub>BW,MW</sub>	.....	mittlerer Aufwandswert für das Bewehren [Std/t]
AW <sub>ERH,ADD</sub>	.....	Aufandswerterhöhung ermittelt durch eine reine Addition der Produktivitätsverluste
AW <sub>ERH,AGG</sub>	.....	Aufandswerterhöhung ermittelt durch eine Aggregation der Produktivitätsverluste
AW <sub>ERH,i</sub>	.....	Aufandswerterhöhung (Einzelproduktivitätsverlust)
AW <sub>ERH,i,j</sub>	.....	Aufandswerterhöhung der Einzelproduktivitätsverlustes i; beeinflusst durch den Einzelproduktivitätsverlust j
AW <sub>IST</sub>	.....	IST-Aufwandswert
AW <sub>S</sub>	.....	Aufwandswert für das Schalen [Std/m <sup>2</sup> ]
AW <sub>S,MW</sub>	.....	mittlerer Aufwandswert für das Schalen [Std/m <sup>2</sup> ]
AW <sub>SOLL</sub>	.....	SOLL-Aufwandswert

$AW_{STB}$	.....	Gesamt-Aufandswert für Stahlbetonarbeiten [Std/m <sup>3</sup> ]
$AW_{STB,ERH,GES}$	.....	Erhöhter Gesamt-Aufandswert für Stahlbetonarbeiten [Std/m <sup>3</sup> ]
$AW_{STB,GRUND}$	.....	Grund-Gesamt-Aufandswert für Stahlbetonarbeiten [Std/m <sup>3</sup> ]
$AW_{STB,NEU}$	.....	neuer Gesamt-Aufandswert für Stahlbetonarbeiten
$AZ_{STB}$	.....	tägliche Arbeitszeit für Stahlbetonarbeiten
$AZ_{STB,Beginn}$	.....	tägliche Arbeitszeit für Stahlbetonarbeiten zu Beginn der Arbeiten bekannt gegeben
$AZ_{STB,Ende}$	.....	tägliche Arbeitszeit für Stahlbetonarbeiten am Ende der Arbeiten bekannt gegeben
$AZ_{STB,n}$	.....	tägliche Arbeitszeit für Stahlbetonarbeiten; nomineller Wert

### B

BAS	.....	Bauarbeitschlüssel
Bez.	.....	Bezeichnung
BK	.....	Baukosten
BOT	.....	Build Operate Transfer
bspw.	.....	beispielsweise
$BT_M$	.....	Betonmenge [m <sup>3</sup> ]
BW	.....	Bewehrung
$bw_g$	.....	Bewehrungsgrad [t/m <sup>3</sup> ] bzw. [kg/m <sup>3</sup> ]
$bw_{g,bwk}$	.....	Bewehrungsgrad für das gesamte Bauwerk [t/m <sup>3</sup> ] bzw. [kg/m <sup>3</sup> ]
BZ	.....	Bauzeit
bzgl.	.....	bezüglich
bzw.	.....	beziehungsweise

### C

°C	.....	Grad Celsius
ca.	.....	zirka
cos	.....	Cosinus (Winkelfunktion)
Cov	.....	Kovarianz

### D

$\delta$	.....	partiell Differential
d	.....	Arbeitstag(e)
$D_{AN}$	.....	Dauer der Anlaufphase
$D_{AUS}$	.....	Dauer der Auslaufphase
$D_{GES}$	.....	Gesamtdauer
$D_{HP}$	.....	Dauer der Hauptbauphase
$d_i$	.....	Differenz der Rangplätze
$D_{STB}$	.....	Der für Stahlbetonarbeiten
d.h.	.....	das heißt
DIN	.....	Deutsches Institut für Normung
$\Delta AW$	.....	Aufandswertänderung
$\Delta AW_{AK,ERH}$	.....	Aufandswerterhöhung aufgrund von Arbeitskräfteerhöhung



$\Delta AW_{AK,RED}$	.....Aufandswerterhöhung aufgrund von Arbeitskräftereduktion
$\Delta AW_{ERH}$	.....Aufandswerterhöhung
$\Delta AW_{ERH,AF}$	.....Aufandswerterhöhung aufgrund der Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche
$\Delta AW_{ERH,KK}$	.....Aufandswerterhöhung aufgrund verminderter Krankkapazität
$\Delta AW_{ERH,LV}$	.....Aufandswerterhöhung aufgrund veränderter Lichtverhältnisse
$\Delta AW_{ERH,TMP}$	.....Aufandswerterhöhung aufgrund nicht optimaler Temperatur
$\Delta BZ$	.....Bauzeitänderung [%]
$\Delta L$	.....Leistungsänderung
$\Delta PV$	.....Produktivitätsverlust

### E

$E(X)$	.....Erwartungswert
EH	.....Einheit
engl.	.....englisch
ERW	.....erwarteter Wert
et al.	.....und andere
etc.	.....et cetera
evtl.	.....eventuell
EXP	.....Exponent

### F

f	.....folgende Seite
ff	.....folgende Seiten
$f(x)$	.....Funktion von x

### G

Glg.	.....Gleichung(en)
------	--------------------

### H

h	.....Zeitstunde(n)
HOAI	.....Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
Hrsg.	.....Herausgeber

### I

I	.....Input
IQR	.....Interquartilsabstand
ISBN	.....Internationale Standardbuchnummer
ISO	.....International Organization for Standardization

### J

Jh.	.....Jahrhundert
-----	------------------

### K

k	.....Tuningkonstante (M-Schätzer nach Huber)
K	.....Matrixbezeichnung
$k_{Gerät}$	.....Gerätekosten [€/m <sup>3</sup> ]
$k_{Material}$	.....Materialkosten [€/m <sup>3</sup> ]

$K_{STB}$	.....Kosten für die Stahlbetonarbeiten [€]
$K_{STB,EK}$	.....Einzelkosten für die Stahlbetonarbeiten [€]
k.A.	.....keine Angabe(n)
Kap.	.....Kapitel
kg	.....Kilogramm
$KK_{RED}$	.....Krankapazitätsreduktion
KPMG	.....Wirtschaftsprüfungs- und Beratungsunternehmen (Abkürzung ergibt sich aus den Initialen der Gründer: Klynveld, Peat, Marwick und Goerdeler)
KS	.....Kolmogorov-Smirnov(-Test)
KW	.....Kalenderwoche

### L

$\lambda$	.....Eigenwert
$L_{IST}$	.....IST-Leistung
$L_{SOLL}$	.....SOLL-Leistung
$L_{STB}$	.....Leistung für Stahlbetonarbeiten
$L_{STB,ERF}$	.....erforderliche Leistung für Stahlbetonarbeiten
lat.	.....lateinisch
Lfd.Nr.	.....laufende Nummer
ln	.....natürlicher Logarithmus (Excel-Funktion: LN)
LPH	.....Leistungsphase(n)
lt.	.....laut
LV	.....Lichtverhältnisse

### M

$\mu$	.....Erwartungswert
m	.....Meter
m	.....Sicherheitsmarge
M	.....Sicherheitsmarge
M	.....Mensch
$m^2$	.....Quadratmeter
$m^3$	.....Kubikmeter
$M_{a,v,i}$	.....Produktionsmenge [MEH] (a...Ablaufstufe, v...Vorgang, i...Bauteil)
MA	.....ablaufbedingte Unterbrechungen
MAD	.....Median der absoluten Abweichungen
MAK	.....Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
MAX	.....Maximalwert
ME	.....erholungsbedingte Unterbrechungen
MEH	.....Mengeneinheit
MH	.....Haupttätigkeit
MI	.....im Einsatz
MIN	.....Minimalwert
Mio.	.....Million(en)
MK	.....Unterbrechen der Tätigkeit
ML	.....außer Einsatz
$ML_{STB}$	.....Mittellohn für die Stahlbetonarbeiten [€/Std]

MN	.....Nebentätigkeit
MP	.....persönlich bedingte Unterbrechungen
MR	.....Betriebsruhe
MS EXCEL	.....Tabellenkalulationsprogramm der Fa. Microsoft
MS	.....störungsbedingte Unterbrechungen
MSC	.....Mathematics Subject Classification
MT	.....Tätigkeit
$mt_{max}$	.....Mittel aller täglichen Temperaturmaxima
$mt_{min}$	.....Mittel aller täglichen Temperaturminima
MW	.....Mittelwert
MX	.....nicht erkennbare Tätigkeiten
MZ	.....zusätzliche Tätigkeiten

### N

n	.....Anzahl der Nennungen
Nr.	.....Nummer

### O

O	.....Output
ÖBA	.....Örtliche Bauaufsicht
ÖNORM	.....Österreichische Norm
ONR	.....ON-Regel
OR	.....Operations Research

### P

$\pi$	.....Kreiszahl Pi
p	.....Signifikanzwert
PERT	.....Program Evaluation and Review Technique
$PF_{MAX}$	.....maximaler Einsatz der Produktionsfaktoren
$PF_{MW}$	.....mittlerer Einsatz der Produktionsfaktoren
PPH	.....Projektphase(n)
PPP	.....Public Private Partnership
PV	.....Produktivitätsverlust(e)

### R

r	.....Korrelationskoeffizient
R	.....freie Programmiersprache
$r_s$	.....Rangkorrelation
$r_{xy}$	.....Korrelationskoeffizient
REFA	.....Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V.

### S

$\sigma$	.....Standardabweichung
$\sigma_0$	.....Schätzer der Standardabweichung
$\Sigma$	.....Summe
$\Sigma_{a,v,i}$	.....Lohnstundensumme [Std] (a...Ablaufstufe, v...Vorgang, i...Bauteil)
S.	.....Seite(n)
s	.....Standardabweichung
$s_g$	.....Schalungsgrad [ $m^2/m^3$ ]

$S_{g,bwk}$	.....Schalungsgrad für das gesamte Bauwerk [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
$S_x$	.....Standardabweichung der Variablen x
$S_{xy}$	.....Kovarianz
SE	.....Systems Engineering
Sim.Nr.	.....Simulationsnummer
STB	.....Stahlbeton/Stahlbetonarbeiten
Std	.....Lohnstunde(n)
Std.Abw.	.....Standardabweichung
SUB	.....Nachunternehmer (Subunternehmer)
SV	.....Sachverständiger
$s(\bar{X})$	.....Standardfehler des Mittelwerts

### T

t	.....Tonne(n)
T	.....Auftragszeit
$t_7$	.....Temperatur um 7 Uhr
$t_{19}$	.....Temperatur um 19 Uhr
$t_a$	.....Ausführungszeit
$t_e$	.....Zeit je Einheit
$t_{er}$	.....Erholungszeit bzw. Rüsterholungszeit
$t_g$	.....Grundzeit
$t_{MA}$	.....ablaufbedingtes Unterbrechen
$t_{max}$	.....Temperaturmaximum
$t_{ME}$	.....Erholen
$t_{MH}$	.....Haupttätigkeit
$t_{min}$	.....Temperaturminimum
$t_{MN}$	.....Nebentätigkeit
$t_{MP}$	.....persönlich bedingtes Unterbrechen
$t_{MS}$	.....störungsbedingtes Unterbrechen
$t_{MZ}$	.....zusätzliche Tätigkeit
$t_p$	.....persönliche Verteilzeit
$t_r$	.....Rüstzeit
$t_{rg}$	.....Rüstgrundzeit
$t_{rv}$	.....Rüstverteilstzeit
$t_s$	.....sachliche Verteilstzeit
$t_t$	.....Tätigkeitszeit
$t_v$	.....Verteilzeit
$t_w$	.....Wartezeit
Tab.	.....Tabelle(n)
TMP	.....Temperatur
TU	.....Technische Universität

### U

u.a.	.....unter anderem
usw.	.....und so weiter
u.U.	.....unter Umständen

### V

v	.....Schiefe
---	--------------

VarK	..... Variationskoeffizient
Var(X)	..... Varianz
VBA	..... Visual Basic for Applications
Vgl.	..... Vergleiche

### X

$\bar{x}$	..... Mittelwert
$\tilde{x}_0$	..... Median der erhobenen Daten (Berechnung des M-Schätzers)
$x_{0,25}$	..... 1. Quartil
$x_{0,50}$	..... 1. Quartil (Median)
$x_{0,75}$	..... 3. Quartil
$\hat{x}_i$	..... transformierter Datenpunkt im Zuge der Berechnung des M-Schätzers
$x_{\text{mod}}$	..... Modus/Modalwert

### Z

ZAMG	..... Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
z.B.	..... zum Beispiel
ZEH	..... Zeiteinheit

### Sonderzeichen

€	..... Euro
∫	..... Integral
%	..... Prozent
∞	..... Unendlich
$1_n$	..... Einsvektor
$1_n^T$	..... transponierter Einsvektor



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Kostenabweichungen für 258 Großbauprojekte .....	2
Abb. 1-2	Einordnung der Baubetriebs- und Bauwirtschaftswissenschaften .....	6
Abb. 1-3	Hermeneutischer Regelkreis kombiniert mit der Anwendung von Elementen des Systems Engineering .....	7
Abb. 1-4	Die vier Module des Systems Engineering .....	8
Abb. 1-5	Forschungsprofil .....	10
Abb. 1-6	Gliederung der Arbeit – Teil 1 .....	12
Abb. 1-7	Gliederung der Arbeit – Teil 2 .....	13
Abb. 2-1	Unsichere Einflüsse auf ein Bauprojekt (demonstrative Aufzählung) .....	16
Abb. 2-2	Gliederung von Risiken .....	16
Abb. 2-3	Etymologie des Risikobegriffs .....	18
Abb. 2-4	Vergleichbarkeit von Risiken unter Anwendung der Risikogleichung .....	19
Abb. 2-5	Gliederung von Unsicherheiten lt. Knight .....	22
Abb. 2-6	Unsicherheit in der Entscheidungstheorie .....	24
Abb. 2-7	Gliederung von Unsicherheiten .....	25
Abb. 2-8	Subjektive bzw. objektive Bandbreite – subjektive bzw. objektivierbare Wahrscheinlichkeitsverteilung .....	27
Abb. 2-9	Zeitliche Entwicklung der Anzahl an Risikodefinitionen und dem relativen Anteil der Chancen .....	28
Abb. 2-10	Risikodefinitionen .....	29
Abb. 2-11	Gefahren-Chancen-Auffassung des Risikobegriffs .....	30
Abb. 2-12	Chancen-Gefahren-Verteilung des Risikobegriffs .....	31
Abb. 2-13	Mögliche Erwartungsstruktur – Messbarkeit der Unsicherheit .....	32
Abb. 2-14	Darstellung von Chancen und Risiken in Abhängigkeit der gewählten Basis .....	34
Abb. 2-15	Darstellung von Chancen und Risiken in Abhängigkeit der gewählten Basis umgelegt auf anfallende Kosten .....	35
Abb. 3-1	Gliederung von Kennzahlenarten .....	39
Abb. 3-2	Beziehungen zwischen Kennzahlen .....	40
Abb. 3-3	Verwendung von Kennzahlen .....	41
Abb. 3-4	Produktionssystem (Produktivitätswürfel) .....	43
Abb. 3-5	Änderung der Produktivität in Abhängigkeit von Input und Output .....	45
Abb. 3-6	Zusammenhang zwischen Aufwandswerterhöhung [%] und Produktivitätsverlust [%] .....	46

Abb. 3-7	Darstellung eines Arbeitssystems.....	50
Abb. 3-8	Gliederung des Gesamtablaufs .....	51
Abb. 3-9	Auf den Menschen bezogene Ablaufarten – Beispiel: Betonieren einer Decke.....	53
Abb. 3-10	Ableitung der Zeitarten aus den Ablaufarten .....	54
Abb. 3-11	Zusammenfassung von Zeitarten zu Aufwandswerten .....	56
Abb. 3-12	Übersicht der betrachteten Produktivitätsverluste .....	58
Abb. 3-13	Einfluss von Produktivitätsverlusten auf Ablaufarten – demonstrative Darstellung .....	59
Abb. 3-14	Differenzierung der Betrachtungstiefe .....	60
Abb. 3-15	Differenzierung von Aufwandswerten .....	60
Abb. 3-16	Demonstrative Aufzählung der Einflüsse auf die Leistung der Rohbauarbeiten .....	61
Abb. 3-17	Zusammenhang zwischen Aufwandswert, Produktivität und Leistung .....	63
Abb. 4-1	Differenzierung zwischen verschiedenen Stufen und Arten von Aussagen über die Zukunft .....	66
Abb. 4-2	Prognose des Chaoskegels für den Hurrikan „Katrina“ (26. August 2005; 17:00 Uhr) – mögliche Position des Hurrikanzentrums für die nächsten drei Tage.....	67
Abb. 4-3	Unterscheidung zwischen präzisen und richtigen Vorhersagen.....	68
Abb. 4-4	Kostentoleranzen bei professioneller Kostenplanung bzw. bei traditioneller Vorgehensweise.....	69
Abb. 4-5	Beeinflussbarkeit der Kosten über die Projektlaufzeit.....	71
Abb. 4-6	Deterministische Kostenplanung – Budget > Kosten.....	72
Abb. 4-7	Probabilistische Kostenplanung – Budget > Kosten? – Sicherheitsmarge .....	73
Abb. 4-8	Wahl des Angebotspreises im Hinblick auf den wirtschaftlichen und den Angebotserfolg .....	75
Abb. 4-9	Schematische Darstellung gleicher bzw. ähnlicher Prozesse bzw. Prozessketten bei unterschiedlichen Bauprojekten mit veränderten Bauverfahrens-, Bauwerks-, Baustellen- und Betriebsbedingungen .....	77
Abb. 4-10	Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit und Kosten je Einheit .....	78
Abb. 4-11	Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit, Potential, Baugeschwindigkeit und Kosten je Einheit .....	80
Abb. 4-12	Schematische Darstellung der möglichen Kostenentwicklung bei veränderlicher Bauzeit .....	81
Abb. 4-13	Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit und Kosten	81
Abb. 4-14	Zeitkostenkurve einer Arbeit bei Überstunden und Mehrschichtbetrieb .....	82



Abb. 4-15	Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit, Kapazität und Kosten.....	83
Abb. 4-16	Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit und Baukosten.....	83
Abb. 4-17	Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit und Lohnkosten .....	84
Abb. 4-18	Qualitativer Zusammenhang von Kapazität, Bauzeit und Baukosten.....	85
Abb. 4-19	Qualitativer Zusammenhang von Bauzeit und -kosten .....	86
Abb. 4-20	Qualitativer Zusammenhang zwischen der Menge bzw. der Bauzeit und der Kosten für eine Leistungsposition .....	87
Abb. 4-21	Qualitativer Zusammenhang zwischen Bauzeit, Produktivität und Herstellkosten .....	88
Abb. 4-22	Zusammenhang zwischen dem Kranproportionalitätsfaktor und der Bauzeit.....	89
Abb. 4-23	Gründe für eine nicht normale Bauzeit .....	90
Abb. 4-24	Kostenstruktur.....	91
Abb. 4-25	Linearer Zusammenhang zwischen Input und Output – deterministische Betrachtung – Typ 1 .....	93
Abb. 4-26	Zusammenhang zwischen der Änderung der Einflussgröße und dem Aufwandswert – Typ 1 .....	94
Abb. 4-27	Linearer Zusammenhang zwischen Input und Output – probabilistische Betrachtung – Typ 2.....	95
Abb. 4-28	Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Input und Output – deterministische Betrachtung – Typ 3.....	95
Abb. 4-29	Zusammenhang zwischen der Änderung der Einflussgröße und dem Aufwandswert – Typ 3 .....	96
Abb. 4-30	Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Input und Output – probabilistische Betrachtung – Typ 4.....	96
Abb. 4-31	Nichtlinearer probabilistischer Zusammenhang zwischen Input und Output – probabilistische Betrachtung – Typ 5....	97
Abb. 4-32	Verlauf der Aufwandswerterhöhung – Verringerte Krankapazität – Stahlbetonarbeiten.....	99
Abb. 4-33	Verlauf der Aufwandswerterhöhung – Tagestemperatur – Stahlbetonarbeiten.....	100
Abb. 4-34	Produktivitätsverluste bei höherer täglicher Arbeitszeit – Stahlbetonarbeiten.....	101
Abb. 4-35	Verlauf der Aufwandswerterhöhung – Lichtverhältnisse – Stahlbetonarbeiten.....	102
Abb. 4-36	Verlauf der Aufwandswerterhöhung – Veränderung der Arbeitsgruppengröße – Stahlbetonarbeiten.....	103
Abb. 4-37	Verlauf der Aufwandswerterhöhung – Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche - Stahlbetonarbeiten – flächige Bauteile .....	104

Abb. 4-38	Addition (links) und Aggregation (rechts) von Einzelproduktivitätsverlusten .....	106
Abb. 5-1	Begründer der Monte-Carlo-Methode – links: John von Neumann – rechts: Stanislaw Ulam .....	111
Abb. 5-2	Einordnung der Monte-Carlo-Simulation in die Stochastik bzw. in die Mathematik .....	113
Abb. 5-3	Begriffsdefinition – Stochastik, Statistik, Probabilistik, Kombinatorik .....	118
Abb. 5-4	Dichtefunktion einer diskreten (links) und einer stetigen Verteilung (rechts) – qualitative Darstellung .....	121
Abb. 5-5	Kumulative Wahrscheinlichkeitsfunktion einer diskreten (links) und einer stetigen Verteilung (rechts) – qualitative Darstellung .....	121
Abb. 5-6	Dichtefunktion einer Bernoulli-Verteilung (links) und einer allgemeinen diskreten Verteilung (rechts) – qualitative Darstellung .....	122
Abb. 5-7	Dichtefunktion einer Rechteckverteilung (links) und einer PERT-Verteilung (rechts) – qualitative Darstellung ....	123
Abb. 5-8	Dichtefunktion einer LogLogistic-Verteilung (links) und einer Normalverteilung (rechts) – qualitative Darstellung ....	123
Abb. 5-9	Dichtefunktion diskreter (oben) und stetiger (unten) unimodaler (links) und multimodaler (rechts) Verteilungen – qualitative Darstellung .....	124
Abb. 5-10	Dichtefunktion einer rechtsschiefen bzw. linkssteilen (links) und einer linksschiefen bzw. rechtssteilen Verteilung (rechts) – qualitative Darstellung .....	125
Abb. 5-11	Histogramm – qualitative Darstellung .....	125
Abb. 5-12	Lageparameter bei schiefen Verteilungen – qualitative Darstellung .....	127
Abb. 5-13	M-Schätzer nach Huber – qualitative Darstellung.....	127
Abb. 5-14	Änderung des Variationskoeffizienten für die Summe in Abhängigkeit der Anzahl an identischen Summanden und mit unterschiedlichen symmetrischen Verteilungsfunktionen .....	130
Abb. 5-15	Zusammenhang zwischen zwei Variablen x und y bei unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten – oben: Punktwolken – unten: Vektordarstellung.....	133
Abb. 5-16	Erhebungsmethoden für Korrelationen.....	134
Abb. 5-17	Einordnung von Experimentiermöglichkeiten inkl. Klassifikation von Simulationsmodellen.....	135
Abb. 5-18	Schematische Darstellung stufenweiser (links) und wiederholender Iterationen (rechts) .....	137
Abb. 5-19	Funktionsweise der Monte-Carlo-Methode für eine Iteration	139
Abb. 5-20	Prinzipiskizze – Monte-Carlo-Probenerhebungsverfahren – Beispiel für eine ungünstige Probenerhebung.....	141

Abb. 5-21	Prinzipskizze – Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren .....	142
Abb. 5-22	Einfluss der Anzahl an Iterationen auf die Darstellung der Ergebnisse einer Monte-Carlo-Simulation (Latin Hypercube Probenerhebungsverfahren) .....	143
Abb. 5-23	Vergleich des Gesamt-Aufwands werts für die Stahlbetonarbeiten mit unterschiedlichen Verteilungen der Inputparameter .....	145
Abb. 5-24	Addition zweier Verteilungsfunktionen mit unterschiedlicher Schiefe.....	147
Abb. 5-25	Subtraktion zweier Verteilungsfunktionen mit unterschiedlicher Schiefe.....	148
Abb. 5-26	Multiplikation zweier Verteilungsfunktionen mit unterschiedlicher Schiefe.....	148
Abb. 5-27	Division zweier Verteilungsfunktionen mit unterschiedlicher Schiefe.....	149
Abb. 5-28	Qualitativer Verlauf einer stetigen Wahrscheinlichkeitsfunktion für Vorgangsdauern nach Lederer.....	153
Abb. 5-29	Rechtsschiefe Verteilung für Baukosten (qualitative Darstellung) .....	155
Abb. 5-30	Vergleich – Dreiecksverteilung (grau) und LogTriangular-Verteilung (blau) mit den Eingabewerten 2/4/10.....	157
Abb. 5-31	Vergleich – Dreiecksverteilung (grau) und LogTriangular-Verteilung (blau) mit den Eingabewerten 2/8/10.....	157
Abb. 5-32	Vergleich – Dreiecksverteilung (grau), LogTriangular-Verteilung (blau) und neue Verteilung (strichliert) mit den Parametern 2/4/10 .....	158
Abb. 5-33	Vergleich – Dreiecksverteilung (grau), LogTriangular-Verteilung (blau) und neue Verteilung (strichliert) mit den Parametern 2/8/10 .....	158
Abb. 5-34	Vergleich – Dreiecksverteilung (grau), LogTriangular-Verteilung (blau – hier nicht dargestellt, da der $\ln(0)$ nicht definiert ist) und neue Verteilung (strichliert) mit den Parametern 0/4/10 .....	159
Abb. 5-35	Arten der Erhebung von Verteilungsfunktionen .....	170
Abb. 5-36	Qualitative Darstellung möglicher Ausprägungen von Verteilungsfunktionen – Entscheidungsstruktur.....	172
Abb. 5-37	Summe aus zwei identischen Variablen in Abhängigkeit des Korrelationskoeffizienten .....	179
Abb. 5-38	Differenz aus zwei identischen Variablen in Abhängigkeit des Korrelationskoeffizienten .....	180
Abb. 5-39	Produkt aus zwei identischen Variablen in Abhängigkeit des Korrelationskoeffizienten .....	181

Abb. 5-40	Produkt von zwei Dreiecksverteilungen (2; 6; 10) mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = -1$ .....	182
Abb. 5-41	Quotient aus zwei identischen Variablen in Abhängigkeit des Korrelationskoeffizienten .....	182
Abb. 5-42	Summe aus 11 identischen Variablen in Abhängigkeit der Korrelationen im Vergleich mit dem unkorrelierten Ergebnis.....	188
Abb. 5-43	Zusammenhang zwischen Bruttomittellohn und Aufwandswert .....	192
Abb. 5-44	Vergleich von fünf Berechnungsmodi – Ermittlung von Einzelkosten für die Stahlbetonarbeiten .....	202
Abb. 5-45	Darstellung eines Outputs als Histogramm.....	203
Abb. 5-46	Darstellung eines Outputs als Summenkurve.....	204
Abb. 5-47	Normalverteilung – Standardabweichung.....	205
Abb. 6-1	Reifegradmodell.....	210
Abb. 6-2	Zuordnung der ExpertInnen im Hinblick auf die Unternehmensgröße ( $n = 27$ ).....	212
Abb. 6-3	Positionen der ExpertInnen zum Zeitpunkt der Befragung ( $n = 27$ ) .....	212
Abb. 6-4	Berufserfahrung der ExpertInnen ( $n = 27$ ) .....	213
Abb. 6-5	Vergleich zwischen Boxplot (links) und Violinplot (rechts)...	218
Abb. 6-6	Qualitative Gegenüberstellung ausgewählter Boxplots und Violinplots .....	219
Abb. 6-7	Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 6 .....	221
Abb. 6-8	Anzahl der Nennungen von Produktivitätsverlusten bei zu kurzer Bauzeit .....	224
Abb. 6-9	Anzahl der Nennungen von Produktivitätsverlusten bei zu langer Bauzeit .....	227
Abb. 6-10	Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 7 .....	228
Abb. 6-11	Durchschnittliche Anzahl der gemeinsam auftretenden Produktivitätsverluste im Hochbau – bei zu kurzer und zu langer Bauzeit.....	229
Abb. 6-12	Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 8 .....	230
Abb. 6-13	Produktivitätsverluste in der Anlaufphase (in Summe 87 Nennungen).....	231
Abb. 6-14	Produktivitätsverluste in der Hauptbauphase (in Summe 134 Nennungen).....	232
Abb. 6-15	Produktivitätsverluste in der Auslaufphase (in Summe 69 Nennungen).....	233
Abb. 6-16	Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 9 .....	234

Abb. 6-17	Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit .....	234
Abb. 6-18	Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 9a .....	235
Abb. 6-19	Einfluss der Art der Bauzeitänderung auf die Baukosten ....	235
Abb. 6-20	Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 9b .....	236
Abb. 6-21	Grenzen der normalen Bauzeit.....	237
Abb. 6-22	Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 9c.....	238
Abb. 6-23	Maximal sinnvolle Bauzeitverkürzung.....	239
Abb. 6-24	Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 9d .....	239
Abb. 6-25	Violinplots für den Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit.....	241
Abb. 6-26	Zusammenhang zwischen Baukosten und vorgegebener Bauzeit.....	242
Abb. 6-27	Mögliche Korrelationen zwischen den Berechnungsparametern des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten .....	243
Abb. 6-28	Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 10 – Teil 1.....	244
Abb. 6-29	Auszug aus dem Fragebogen der ExpertInnenbefragung – Frage 10 – Teil 2.....	245
Abb. 6-30	Korrelationen zwischen den Parametern des Gesamt-Aufwandswerts für Stahlbetonarbeiten .....	249
Abb. 6-31	Vergleich des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten bei unabhängigen und korrelierten Eingabeparametern.....	251
Abb. 7-1	Beziehungsdreieck .....	256
Abb. 7-2	Schematische Vorgangsweise zur Modellbildung .....	257
Abb. 7-3	Schematische Vorgangsweise zur Modellbildung – inkl. Erweiterung des Modells um probabilistische Komponenten.....	258
Abb. 7-4	Herkunft von Aufwandswerten.....	259
Abb. 7-5	Qualitativer Ablauf der Dokumentation .....	260
Abb. 7-6	Wirkungsgraph – Zusammenhang zwischen Bauzeit und Baukosten.....	262
Abb. 7-7	Qualitativer Wirkungszusammenhang – Detailbetrachtung.	263
Abb. 7-8	Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz bei der Betrachtung von Produktivitätsverlusten.....	264
Abb. 7-9	Erforderliche Leistung infolge Bauzeitveränderung .....	266
Abb. 7-10	Qualitative Darstellung für die Ermittlung eines globalen Optimums für zwei zu optimierende Größen inkl. nicht vermeidbarer Streuungen .....	274

Abb. 7-11	Regelkreis für die probabilistische Optimierung.....	276
Abb. 8-1	Musiktheater Linz – 3D-Visualisierung – Schnitt.....	281
Abb. 8-2	Schematische Darstellung des Berechnungsmodells.....	289
Abb. 8-3	Profil der berücksichtigten Produktivitätsverluste .....	290
Abb. 8-4	Fehlermeldung bei falscher Eingabe .....	292
Abb. 8-5	Aufwandswerterhöhung in Folge der Arbeitsgruppenvergrößerung – schematische Darstellung..	301
Abb. 8-6	Aufwandswerterhöhung in Folge der Arbeitsgruppenverkleinerung – schematische Darstellung..	301
Abb. 8-7	Prozentuelle Aufwandswerterhöhung – Addition .....	303
Abb. 8-8	Neuer Gesamt-Aufwandswert – Addition – Vergleich deterministischer und probabilistischer Ergebnisse.....	304
Abb. 8-9	Prozentuelle Aufwandswerterhöhung – Vergleich probabilistischer Addition und Aggregation.....	305
Abb. 8-10	Neuer Gesamt-Aufwandswert – Vergleich deterministischer und probabilistischer Ergebnisse – Addition und Aggregation .....	305
Abb. 8-11	Profil der berücksichtigten Produktivitätsverluste – Kombination 1 – AD .....	307
Abb. 8-12	Kombination 1 – AD – verringerte Krankkapazität und Überschreitung der Arbeitsgruppengröße – Vergleich deterministischer und probabilistischer Ergebnisse – Addition und Aggregation .....	307
Abb. 8-13	Profil der berücksichtigten Produktivitätsverluste – Kombination 2 – CD.....	308
Abb. 8-14	Kombination 2 – CD – erhöhte tägliche Arbeitszeit und Überschreitung der Arbeitsgruppengröße – Vergleich deterministischer und probabilistischer Ergebnisse – Addition und Aggregation .....	309
Abb. 8-15	Kombination 2 – CD – erhöhte tägliche Arbeitszeit und Überschreitung der Arbeitsgruppengröße – Vergleich der prozentuellen Aufwandswerterhöhung – Addition und Aggregation .....	309
Abb. 8-16	Profil der berücksichtigten Produktivitätsverluste – Kombination 3 – ACD .....	310
Abb. 8-17	Kombination 3 – ACD – verringerte Krankkapazität, erhöhte tägliche Arbeitszeit und Überschreitung der Arbeitsgruppengröße – Vergleich deterministischer und probabilistischer Ergebnisse – Addition und Aggregation .....	311
Abb. 8-18	Vergleich der Ergebnisse der betrachteten Kombinationen.	312
Abb. 8-19	Prozentueller Anteil der Hauptbauphase .....	313
Abb. 8-20	Prozentuelle Aufwandswerterhöhung – Kombination 3 – Aggregation .....	313
Abb. 8-21	Prozentuelle Aufwandswerterhöhung – Kombination 3 –	

	Aggregation – auf den Anteil der Hauptbauphase umgelegt	314
Abb. 8-22	Vergleich der nichtlinearen Kurvenverläufe für den Zusammenhang der vorgegebenen Bauzeit und der Baukosten bzw. der Aufwandswerterhöhung .....	314
Abb. 8-23	Erhöhter Aufwandswert – Kombination 3 – Aggregation – auf den Anteil der Hauptbauphase umgelegt .....	315
Abb. 8-24	Lohnkosten – Kombination 3 – Aggregation – auf den Anteil der Hauptbauphase umgelegt .....	316





## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Zusammenhang von risikoverwandten Begriffen .....	37
Tab. 3-1	Einflüsse auf die Teilproduktivitäten getrennt nach elementaren Produktionsfaktoren .....	48
Tab. 3-2	Beispiel eines Aufnahmeblatts für Multimomentaufnahmen – Bewehrungsarbeiten für eine Hochhausbaustelle .....	57
Tab. 4-1	Einflüsse auf die Baukosten- und Bauzeitermittlung des AN – demonstrative Aufzählung .....	74
Tab. 4-2	Kranproportionalitätsfaktoren – Maximale Anzahl an Arbeitskräften je Kran beim Einsatz eines Obendreher-Krans .....	89
Tab. 5-1	Gängige kommerzielle Softwareprogramme für die Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen .....	119
Tab. 5-2	Tuningkonstante k für die M-Schätzer nach Huber („Huber Proposal 2“) .....	128
Tab. 5-3	Standardabweichungen der Summe mehrerer Variablen – Vergleich der Ergebnisse aus der mathematischen Berechnung und der Monte-Carlo-Simulation .....	129
Tab. 5-4	Bivariate Korrelationsarten .....	131
Tab. 5-5	Deterministische Berechnung der Einzelkosten für Stahlbetonarbeiten .....	138
Tab. 5-6	Probabilistische Berechnung der Einzelkosten für Stahlbetonarbeiten .....	139
Tab. 5-7	Beispielhafte deterministische Berechnung des Gesamt-Aufwandswerts für Stahlbetonarbeiten .....	144
Tab. 5-8	Beispielhafte Berechnung des Gesamt-Aufwandswerts für Stahlbetonarbeiten – Dreiecksverteilungen .....	144
Tab. 5-9	Auswertung ausgewählter Literaturansätze für Verteilungsfunktionen unterschiedlicher Parameter – Teil 1	167
Tab. 5-10	Auswertung ausgewählter Literaturansätze für Verteilungsfunktionen unterschiedlicher Parameter – Teil 2	168
Tab. 5-11	Auswertung ausgewählter Literaturansätze für Verteilungsfunktionen unterschiedlicher Parameter – Teil 3	169
Tab. 5-12	Einfluss von Korrelationen auf die Streuung und den Mittelwert getrennt nach den vier Grundrechenarten .....	183
Tab. 5-13	Ansatz einer Korrelationsmatrix für den Fall, dass die Korrelationen zwischen der ersten und den nachfolgenden Variablen jeweils +0,9 entspricht .....	184
Tab. 5-14	Automatisch von @Risk angepasste Korrelationsmatrix – bezogen auf die Matrix in Tab. 5-13 .....	185
Tab. 5-15	Anpassungsfaktor-Matrix – bezogen auf die Matrix in Tab. 5-13 .....	186
Tab. 5-16	Angepasste Korrelationsmatrix unter Berücksichtigung	

	der Anpassungsmatrix in Tab. 5-15 – bezogen auf die Korrelationsmatrix in Tab. 5-13 .....	187
Tab. 5-17	Korrelationsmatrix für Kostenkomponenten im Hochbau ..	192
Tab. 5-18	Kategorisierung von Korrelationskoeffizienten .....	193
Tab. 5-19	Korrelationsmatrix nach Yang .....	194
Tab. 5-20	Vergleich ausgewählter Literaturansätze zu Korrelationen	200
Tab. 6-1	Parameter der deskriptiven Datenauswertung .....	215
Tab. 6-2	Ermittlung der relativen Häufigkeit einzelner Produktivitätsverluste bezogen auf die Gesamtanzahl der genannten Kombinationen – zu kurze Bauzeit .....	223
Tab. 6-3	2er, 3er und 4er Kombinationen von Produktivitätsverlusten bei zu kurzer Bauzeit .....	225
Tab. 6-4	Ermittlung der relativen Häufigkeit einzelner Produktivitätsverluste bezogen auf die Gesamtanzahl der genannten Kombinationen – zu lange Bauzeit .....	226
Tab. 6-5	2er und 3er Kombinationen von Produktivitätsverlusten bei zu langer Bauzeit .....	227
Tab. 6-6	Deskriptive Darstellung der Daten zur Anzahl an Produktivitätsverlusten bei zu kurzer und zu langer Bauzeit im Hochbau .....	229
Tab. 6-7	Deskriptive Darstellung der Daten zu den Grenzen der normalen Bauzeit .....	236
Tab. 6-8	Deskriptive Darstellung der Daten zur maximale sinnvollen Bauzeitverkürzung .....	238
Tab. 6-9	Deskriptive Darstellung der Daten für den Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit – zu kurze Bauzeit .....	240
Tab. 6-10	Deskriptive Darstellung der Daten für den Zusammenhang zwischen Baukosten und Bauzeit – zu lange Bauzeit .....	240
Tab. 6-11	Deskriptive Darstellung zu den Angaben der Korrelationen zwischen Parametern zur Berechnung des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten – Teil 1 ..	248
Tab. 6-12	Deskriptive Darstellung zu den Angaben der Korrelationen zwischen Parametern zur Berechnung des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten – Teil 2 ..	248
Tab. 6-13	Eingabedaten für die Berechnung des Gesamt-Aufwandswerts der Stahlbetonarbeiten .....	250
Tab. 6-14	Korrelationsmatrix mit den M-Schätzern der ExpertInnenbefragung .....	251
Tab. 7-1	Lastenheft für ein Berechnungsmodell zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten – Teil 1	270
Tab. 7-2	Lastenheft für ein Berechnungsmodell zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten – Teil 2	271

Tab. 7-3	Pflichtenheft für ein Berechnungsmodell zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten – Teil 1	272
Tab. 7-4	Pflichtenheft für ein Berechnungsmodell zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Berechnung von Baukosten und Bauzeiten – Teil 2	273
Tab. 7-5	Demonstrative Einflüsse auf Komponenten eines Optimierungssystems .....	278
Tab. 8-1	Mengenermittlung – Musiktheater Linz .....	282
Tab. 8-2	Ermittlung der normalen Bauzeit .....	283
Tab. 8-3	Berechnung der mittleren Mindestarbeitsfläche .....	285
Tab. 8-4	Optimale Arbeitsgruppengröße je Bauteilgruppe .....	286
Tab. 8-5	Mengenanteile .....	286
Tab. 8-6	Anteilige Gruppengröße .....	287
Tab. 8-7	Mittlere optimale Arbeitsgruppengröße .....	287
Tab. 8-8	Berechnungstabelle – Eingabewerte/Grunddaten/Ressourceneinsatz .....	291
Tab. 8-9	Berechnungstabelle – Addition – Verringerte Krankkapazität	291
Tab. 8-10	Berechnungstabelle – Addition – Unterschreitung der Mindestarbeitsfläche .....	292
Tab. 8-11	Berechnungstabelle – Addition – Erhöhte tägliche Arbeitszeit .....	293
Tab. 8-12	Berechnungstabelle – Addition – Veränderte Arbeitsgruppengröße .....	294
Tab. 8-13	Berechnungstabelle – Addition – Veränderte Lichtverhältnisse .....	295
Tab. 8-14	Berechnungstabelle – Addition – Nicht optimale Tagestemperatur .....	296
Tab. 8-15	Berechnungstabelle – Addition – Zusammenfassung der Aufwandswerterhöhungen .....	296
Tab. 8-16	Berechnungstabelle – Aggregation – Teil 1 .....	297
Tab. 8-17	Berechnungstabelle – Aggregation – Teil 2 .....	298
Tab. 8-18	Matrixschreibweise der aggregierten Aufwandswerterhöhung .....	299
Tab. 8-19	Berechnungstabelle – Aggregation – Verringerte Krankkapazität .....	300
Tab. 8-20	Berechnungstabelle – Aggregation – Nicht optimale Tagestemperatur .....	300
Tab. 8-21	Eingabewerte für die probabilistischen Berechnungen – Dreiecksverteilungen .....	302

